

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE RIEGO

**RIEGO DE PRECISIÓN:
DISEÑO, APLICACIÓN Y EVALUACIÓN**

RD1405.1

Dr. Jorge Flores Velázquez (Jefe de Proyecto)

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias

M.C. Jorge A. Castillo González

Informe Final

Diciembre, 2014



Directorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

DIRECTOR GENERAL

M.I. Victor Javier Bourguett Ortíz

COORDINADOR DE RIEGO Y DRENAJE

Dr. Nahum Hamed García Villanueva

SUBCOORDINADOR DE RIEGO

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

PARTICIPANTES

Dr. Jorge Flores Velázquez (Jefe de Proyecto)

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias

M.C. Jorge A. Castillo González

RESUMEN EJECUTIVO

Una de las principales actividades de la subcoordinación de Ingeniería de Riego ha sido y es el diseño de sistemas de riego parcelario y la generación de propuestas tecnológicas y metodológicas para la mejora para su operación y mantenimiento en diversas regiones agrícolas del país. Sin embargo, dichas actividades se realizan usando herramientas convencionales en las que no se aprovecha al máximo las tecnologías mejoradas y perfeccionadas en la última década en materia de software.

Los avances en las tecnologías de la información, comunicación, equipo instrumental y computacional han facilitado las tareas asociadas al diseño, operación, aplicación y evaluación del riego a nivel parcelario, por lo que se requiere de una revisión de estado de arte y la adaptación de componentes, métodos y herramientas informáticas e instrumentales existen para incorporarlos en los proyectos de ingeniería de riego que realiza el IMTA, a fin de mejorar los tiempos de respuesta y la calidad de los trabajos demandados por los usuarios y módulos de riego del país.

En este documento se presentan los resultados de la evaluación de cuatro programas comerciales para el diseño de riego presurizado: IRRICAD, WCADI, IrrigaCAD e IrriPro; Se analizó su desempeño con base a normas internacionales especializadas en evaluación de software. Entre los resultados obtenidos IRRICAD, WCADI e IrriPro cuentan con su propio entorno gráfico, mientras que IrrigaCAD se auxilia de AutoCAD Civil 3D. Todos demostraron ser útiles para el diseño de Sistemas de Riego Presurizado, teniendo fortalezas con respecto a los demás, en la evaluación realizada el mejor desempeño gráfico, hidráulico, de diseño, etc. lo obtuvo IRRICAD.

Por otra parte, en la operación de los sistemas de riego, el calendario de riego de los cultivos, se establece atendiendo principalmente condiciones del clima y cultivo promedio, no obstante en grandes extensiones dichas condiciones pueden presentar alta variabilidad en tiempo y espacio y en consecuencia la aplicación del agua en forma de riego también exige una calendarización precisa del riego de acuerdo a las necesidades de los cultivos; para un mejor acoplamiento del riego, en respuesta a la variabilidad de las necesidades hídrica de los cultivos, es preciso aplicar el agua de riego en forma diferencial usando información climática de manera automatizada e información del desarrollo de los cultivos y así calendarizar el riego con mayor precisión en tiempo real, apoyado en los avances recientes en tecnologías de información e instrumental agronómico. En este sentido se desarrolló una "Aplicación computacional para calendarizar riego en tiempo real vía internet con actualización automatizada de información meteorológica", la cual se describe en este documento.

Siguiendo con la mejora de la operación dentro del marco de la Agricultura de Precisión y como parte de este proyecto, se validó un hidrante parcelario automatizado para la entrega volumétrica en módulos de riego. Uno de los resultados adicionales del proyecto fue la elaboración del libro sobre principios computacionales y agronómicos para calendarizar el riego en tiempo real así como la elaboración de tres artículos científicos sobre el tema

CONTENIDO

1	Revisión, prueba y aplicabilidad de programas computacionales comerciales para el diseño de sistemas de riego presurizado.....	11
1.1	El riego en México.....	12
1.1.1	Superficie regada en México.....	14
1.2	Diseño de los sistemas de riego presurizado.....	15
1.2.1	Etapas para el del diseño de los sistemas de riego.....	16
1.3	Programas informáticos comerciales para el diseño de riego presurizado.....	17
1.3.1	WCADI.....	17
1.3.2	GESTAR.....	18
1.3.3	IRRICAD.....	19
1.3.4	IRRIGACAD.....	21
1.3.4.1	Requisitos de IrrigaCAD.....	22
1.3.5	Irripro.....	23
1.4	Materiales y Metodología.....	30
1.4.1	Materiales.....	30
1.4.2	Metodología.....	31
1.4.2.1	Datos generales del proyecto.....	31
1.4.2.2	Diseño agronómico.....	35
1.4.2.3	Diseño del sistema de riego mediante IRRICAD.....	36
1.4.2.4	Diseño del sistema de riego usando WCADI.....	37
1.4.2.5	Diseño del sistema de riego usando IrrigaCAD.....	38
1.4.3	Criterios para la evaluación cualitativa del desempeño de los programas comerciales para el diseño.....	38
1.4.3.1	Funcionalidad.....	39
1.4.3.1.1	Adecuación.....	39
1.4.3.1.2	Exactitud.....	40
1.4.3.1.3	Interoperabilidad.....	40
1.4.3.1.4	Seguridad.....	40
1.4.3.2	Fiabilidad.....	40
1.4.3.2.1	Madurez.....	41
1.4.3.2.2	Tolerancia a errores.....	41
1.4.3.2.3	Recuperabilidad.....	41
1.4.4	Usabilidad.....	41
1.4.4.1.1	Entendimiento.....	41
1.4.4.1.2	Aprendizaje.....	42
1.4.4.1.3	Operabilidad.....	42
1.4.4.1.4	Atracción.....	42
1.4.5	Eficiencia.....	42
1.4.5.1	Comportamiento de tiempos.....	42
1.4.5.2	Utilización de recursos.....	42
1.4.5.3	Eficiencia según tiempo, recursos y resultados obtenidos.....	42
1.4.5.4	Capacidad de mantenimiento.....	43
1.4.5.4.1	Capacidad de ser analizado.....	43
1.4.5.4.2	Cambiabilidad.....	43
1.4.5.4.3	Estabilidad.....	43
1.4.5.5	Portabilidad.....	43
1.4.5.5.1	Adaptabilidad.....	43
1.4.5.5.2	Facilidad de instalación.....	44
1.4.5.5.3	Coexistencia.....	44
1.4.5.6	Calidad en uso.....	44
1.4.5.6.1	Efectividad.....	44
1.4.5.6.2	Productividad.....	44
1.5	Resultados.....	44
1.5.1	Funcionalidad.....	45
1.5.1.1	Adecuación.....	45
1.5.1.2	Exactitud.....	48
1.5.1.3	Interoperabilidad.....	48
1.5.1.4	Seguridad.....	48
1.5.1.5	Fiabilidad.....	49
1.5.1.5.1	Madurez.....	49
1.5.1.5.2	Tolerancia a errores.....	49

1.5.1.5.3	Recuperabilidad	49
1.5.1.6	Usabilidad.....	49
1.5.1.6.1	Entendimiento.....	49
1.5.1.6.2	Aprendizaje	49
1.5.1.6.3	Operabilidad	50
1.5.1.6.4	Atracción.....	50
1.5.1.7	Eficiencia	50
1.5.1.7.1	Comportamiento de tiempos.....	50
1.5.1.7.2	Utilización de recursos	50
1.5.1.7.3	Eficiencia según tiempo, recursos y resultados obtenidos.....	50
1.5.2	Capacidad de mantenimiento	52
1.5.2.1	Capacidad de ser analizado	52
1.5.2.2	Cambiabilidad	52
1.5.2.3	Estabilidad	52
1.5.3	Portabilidad	52
1.5.3.1	Adaptabilidad.....	52
1.5.3.2	Facilidad de instalación.....	52
1.5.3.3	Coexistencia	53
1.5.3.4	Calidad en uso	53
1.5.3.4.1	Efectividad	53
1.5.3.4.2	Productividad	53
1.5.3.4.3	Seguridad	53
1.6	Conclusiones.....	53
1.6.1	Conclusiones generales	54
2	Aplicación computacional para calendarizar riego en tiempo real vía internet con actualización automatizada de información meteorológica.....	55
2.1	Definición de requerimientos.....	56
2.1.1	Análisis de requerimientos, alcances y limitaciones de la aplicación	56
2.1.2	Plataforma Web.....	57
2.1.2.1	Administración de la información meteorológica.....	57
2.1.2.2	Administración de Técnicos.....	58
2.1.2.3	Administración de Parcelas.....	58
2.1.2.4	Aplicación para dispositivos móviles Android.....	58
2.1.2.5	Herramientas de desarrollo	58
2.1.2.5.1	Vaadin	58
2.1.2.5.2	EclipseLink.....	59
2.1.2.5.3	MySQL	59
2.2	Desarrollo de la aplicación.....	59
2.2.1	Estaciones Meteorológicas.....	63
2.2.2	Distritos y Módulos de riego	63
2.2.3	Usuarios	64
2.2.4	Parcelas.....	65
2.2.5	Siembras	66
2.3	Pruebas y validación.....	67
2.3.1	Administración de la información del padrón de parcelas.....	67
2.3.2	Acceso a la aplicación por medio de usuario y contraseña.....	70
2.3.3	2.3.3. Seguimiento de las siembras y riegos.....	71
2.3.3.1	2.3.3.1. Seguimiento de siembras	71
2.4	Documentación.....	72
2.4.1	Manual de usuario aplicación Web	72
2.4.1.1	Administración de catálogos.....	72
2.4.1.2	Administración de la información meteorológica.....	72
2.4.1.3	Administración de Técnicos.....	72
2.4.1.4	Administración de Parcelas.....	73
2.4.2	Manual de usuario aplicación móvil.....	73
2.4.2.1	2.4.2.1. Descripción de la aplicación móvil.....	73
2.4.2.2	Acceso a la aplicación móvil.....	74
2.4.2.3	Actualización de información.....	76
2.4.2.3.1	Visualización de catálogos.....	76
2.4.2.3.2	Catálogo de Cultivos	76
2.4.2.3.3	Catálogo de Suelos	78
2.4.2.3.4	Catálogo de sistemas de riego	79
2.4.2.3.5	Catálogo de Estaciones climatológicas.....	80

2.4.2.3.6	Climatología.....	81
2.4.2.3.7	Administración de parcelas.....	83
2.4.2.3.8	Nueva siembra.....	88
2.5	2.5. Puesta en marcha.....	89
2.5.1	2.5.1. Instalación de la aplicación bajo equipo con sistema operativo Debian 6.....	89
2.5.1.1	Instalación de base de datos: MySQL.....	89
2.5.1.2	Instalación de java: JDK.....	90
2.5.1.3	Instalación de contenedor de servlets: Servidor Apache Tomcat.....	91
2.5.1.4	Despliegue del proyecto.....	93
2.5.2	Por medio de máquina virtual VMware Player.....	95
2.5.2.1	Instalación de VMware Player en sistema operativo Linux.....	95
2.5.2.2	Ejecutar máquina virtual previamente creada.....	96
3	Integración y validación de un hidrante parcelario automatizado para la entrega volumétrica en módulos de riego.....	99
3.1.1	Marco de Referencia.....	100
3.1.2	Gootem GR.....	101
3.1.3	Ventajas principales.....	101
3.1.4	Componentes del sistema.....	102
3.1.5	Características principales.....	102
3.1.5.1	Comunicación inalámbrica.....	102
3.1.5.2	Parada del riego en caso de lluvia o viento.....	102
3.1.5.3	Sistema de riego modular y flexible.....	103
3.1.5.4	Centralización del riego.....	103
3.1.5.5	Recopilación de históricos de riego.....	103
3.1.5.6	Independencia y programación especial.....	103
3.1.5.7	Interfaz gráfica e intuitiva.....	103
3.1.5.8	Ahorro de agua y energía.....	103
3.1.5.9	Envío de alarmas al teléfono móvil.....	103
3.1.6	Software (centro de control).....	104
3.1.7	Unidad maestra: concentrador.....	105
3.1.7.1	Unidades remotas.....	106
3.1.7.2	Sensor de humedad.....	107
3.1.7.3	Radio módem.....	107
3.1.7.4	Ventajas de instalación.....	108
3.1.8	Algunos trabajos realizados.....	109
3.2	Selección de parcelas piloto para validar el funcionamiento del hidrante.....	110
3.2.1	Sitio 1. Guasave.....	110
3.2.2	Sitio 2. Km 2 Canal Lousiana.....	112
3.2.3	Sitio 3. Canal Taxtes 9+500.....	115
3.2.4	Sitio 4. Cerillos derivación Pico de Pato.....	116
3.2.5	Sitio 5. Tetameche.....	118
4	Conclusiones.....	122
5	Bibliografía.....	124
6	Anexos.....	126
	ANEXO A: Artículos generados en el marco del proyecto.....	127
	ANEXO B: Manual De Uso De Los Programa Computacionales.....	160
	B1. Diseño del sistema de riego usando IRRICAD.....	160
	B2. Diseño del sistema de riego usando WCADI.....	177
	B3. Diseño del sistema de riego usando IrrigaCAD.....	195
	ANEXO C: Libro técnico sobre principios computacionales y agronómicos para calendarizar el riego en tiempo real.....	208

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de las áreas regadas en distritos y unidades de riego en México.	13
Figura 2. Proceso de diseño en WCADI (Fuente: WCADI, 2012)	18
Figura 3. Esquema básico de diseño en IRRIGACAD.	21
Figura 4. Programa de diseño IrrigaCAD	22
Figura 5. Limitaciones de la versión Freeware de IriPro.	25
Figura 6. Utilización de Google Earth para trazo y elevaciones.	25
Figura 7. Pantalla inicial del Wizard.	26
Figura 8. Importación de archivos CAD.....	27
Figura 9. Utilización de la tecnología INDO para el trazo del sistema de riego.	27
Figura 10. Mapa temático.....	28
Figura 11. Mapa de contorno o 3D.	28
Figura 12. Base de datos de elementos de sistema de riego.....	29
Figura 13. Catálogo de Conceptos con costo.	30
Figura 14. Herramientas de desarrollo.....	60
Figura 15. Diagrama ER de la base de datos.	62
Figura 16. Diagrama Entidad - Relación para estaciones climatológicas.....	63
Figura 17. Diagrama Entidad - Relación para Zonas agrícolas.....	64
Figura 18. Diagrama Entidad - Relación para usuarios del sistema.	64
Figura 19. Diagrama Entidad - Relación para parcelas.	66
Figura 20. Diagrama Entidad - Relación para siembras.	67
Figura 21. Ventana principal para la administración de parcelas.....	68
Figura 22. Ventana de datos generales de las parcelas.	68
Figura 23. Ventana de datos geográficos de las parcelas.	69
Figura 24. Ventana de datos del dueño de las parcelas.....	69
Figura 25. Ventana de datos del técnico de las parcelas.....	70
Figura 26. Ventana de acceso a la aplicación.	70
Figura 27. Ventana para el seguimiento de siembras.	71
Figura 28. Mapa de aplicación de calRiegoMovil.	73
Figura 29. Pantalla de login para tener acceso a la aplicación móvil.	74
Figura 30. Pantalla principal de la aplicación callRiegoMovil.	75
Figura 31. Pantalla con el listado de catálogos de la aplicación.....	76
Figura 32. Catálogo de cultivos.	77
Figura 33. Datos del cultivo.	77
Figura 34. Catálogo de suelos.	78
Figura 35. Datos del suelo.....	78
Figura 36. Catálogo de Sistemas de Riego.	79
Figura 37. Datos del Sistema de Riego.....	80
Figura 38. Catálogo de estaciones climatológicas.....	80
Figura 39. Datos del Sistemas de estaciones climatológicas.....	81
Figura 40. Ejemplo de gráfica de ET ₀ desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014. 81	
Figura 41. Ejemplo de gráfica de ET ₀ desde la aplicación móvil para simulación de febrero del 2014.	82
Figura 42. Ejemplo de gráfica de Tmedia desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014.....	83
Figura 43. Ejemplo de gráfica de Tmedia desde la aplicación móvil para simulación de febrero del 2014.....	83
Figura 44. Ejemplo de gráfica de Pp desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014. 83	
Figura 45. Pantalla de con pestaña 1 de información de parcelas.	84
Figura 46. Pantalla de con pestaña 2 de información de parcelas.	85
Figura 47. Pantalla de con pestaña 3 de información de parcelas.	85
Figura 48. Pantalla de con pestaña 4 de información de parcelas.	86
Figura 49. Pantalla de con pestaña 5 de información de parcelas.	86
Figura 50. Pantalla de siembras por parcela.	87
Figura 51. Pantalla para edición de siembras.	87
Figura 52. Pantalla de guardar modificaciones de una siembras.....	88
Figura 53. Agregar datos de nueva siembra.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 54. Pantalla de modificar datos de siembra.	89
Figura 55. Gestor de aplicaciones de Apache Tomcat.	93
Figura 56. Aplicaciones desplegadas en el Gestor de Apache Tomcat.	94
Figura 57. Página de acceso a la aplicación.	94
Figura 58. Instalación de VMware Player.	96
Figura 59. Arrancar VMware Player en sistema operativo Linux.	97
Figura 60. Ubicar el archivo de máquina virtual.	98
Figura 61. Sistema operativo cargado en máquina virtual.	98
Figura 62. Componentes del sistema Gootem GR	102
Figura 63. Conectividad del sistema Gootem GR	104
Figura 64. Monitoreo de los diferentes componentes del sistema	105
Figura 65. Unidad central almacenadora	106
Figura 66. Unidades remotas.	106
Figura 67. Representación del Radiomódem	108
Figura 68. Sistema de automatización completo con comunicación vía radio.	110
Figura 69. Derivación del canal principal hacia la zona de riego	111
Figura 70. Puerta deslizante en la zona de riego	112
Figura 71. Canal principal Taxtes	113
Figura 72. Depósito de agua	113
Figura 73. Tubería de conducción	114
Figura 74. Alimentación pivote central	114
Figura 75. Placa técnica de bomba	115
Figura 76. Canal principal Taxtes	115
Figura 77. Cabezal de bombeo	116
Figura 78. Compuerta deslizante en canal principal	116
Figura 79. Canal de riego	117
Figura 80. Depósito de agua	117
Figura 81. La zona de riego, 60 has de frijol por pivote central	118
Figura 82. Toma de agua del fin de canal, y llevada a un estanque para su bombeo.	118
Figura 83. Sistema de bombeo turbina vertical	119
Figura 84. Tubería de conducción	119
Figura 85. Sistema de inyección	120
Figura 86. Sistema de riego por goteo en maíz, aproximadamente 30 has.	120
Figura 87. Mapa de sitios de las parcelas piloto para probar el hidrante	121
Figura 88. Selección de la base de datos y del sistema de unidades	160
Figura 89. Importación de archivo de elevaciones y distribución parcelaria	161
Figura 90. Parámetros de diseño para laterales de zona de riego	162
Figura 91. Parámetros de diseño para bloque de zona de riego	163
Figura 92. Zona de riego con líneas laterales, secundaria y válvula de control	164
Figura 93. Parámetros de diseño para laterales de zona de riego	165
Figura 94. Zona de riego con líneas laterales, secundaria y válvula de control	166
Figura 95. Parámetros de diseño para tubería principal	167
Figura 96. Parámetros de la fuente de abastecimiento	167
Figura 97. Red principal, fuente de abastecimiento y conexión de válvulas	168
Figura 98. Optimización de tubería secundaria	169
Figura 99. Especificaciones de válvula	170
Figura 100. Pérdida de carga-gasto para válvulas Nelson selenoid	170
Figura 101. Turnos de riego	171
Figura 102. Optimización de tubería principal	172
Figura 103. Reporte hidráulico de los tramos de tubería	173
Figura 104. Compilación de material por bloque de riego.	173
Figura 105. Compilación de material del proyecto	173
Figura 106. Distribución de presiones en bloque de riego.	174
Figura 107. Variación de gasto en un bloque de riego	175
Figura 108. Gradiente hidráulico de la tubería secundaria	176
Figura 109. Gradiente hidráulico de la red principal	177
Figura 110. Datos generales del proyecto	178
Figura 111. Tubería para diseño de red secundaria	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 112. Cinta de goteo para diseño de laterales	179
Figura 113. Bloques de riego y topografía.....	181
Figura 114. Importación de información de AutoCAD	182
Figura 115. Curvas de nivel y bloques de riego en la plataforma grafica de WCADI.....	183
Figura 116. Parámetros de diseño para subareas de riego	184
Figura 117. Parámetros de diseño para bloques de riego	185
Figura 118. Laterales de riego en un bloque	186
Figura 119. Diseño de tubería secundaria.....	187
Figura 120. Parámetros de diseño tubería principal.....	188
Figura 121. Tubería principal, nodos, válvulas y fuente de abastecimiento.....	189
Figura 122. Confirmación de conexión de la tubería principal.	189
Figura 123. Turnos de riego.....	190
Figura 124. Información de turnos de riego	191
Figura 125. Información de tramos de tuberías.....	191
Figura 126. Diseño de diámetros de red principal	192
Figura 127. Presión y velocidad del sistema	193
Figura 128. Presión en los nodos del sistema.....	193
Figura 129. Especificaciones de bloques de riego	194
Figura 130. Ejecución de AutoCAD e IrrigaCAD	195
Figura 131. Crear topografía.....	196
Figura 132. Agregar topografía existente.....	196
Figura 133. Topografía en AutoCAD Civil 3D	196
Figura 134. Configuración de datos técnicos	197
Figura 135. Configuración de ruta de guardado	197
Figura 136. Datos generales.....	198
Figura 137. Archivos de tubería	198
Figura 138. Herramienta para cálculo de lateral.....	199
Figura 139. Parámetros técnicos de la lateral	200
Figura 140. Datos del emisor y obtención de la longitud máxima de la lateral	200
Figura 141. Trazo del sentido de riego y de texto	200
Figura 142. Datos técnicos de la tubería secundaria.....	201
Figura 143. Trazo de la tubería secundaria	201
Figura 144. Trazo de las laterales y cálculo de la tubería secundaria	202
Figura 145. Herramienta para el trazo de la tubería principal.....	203
Figura 146. Herramienta para el trazo de la fuente	203
Figura 147. Herramienta DepuraRed.....	203
Figura 148. Herramienta Numera	203
Figura 149. Herramienta MovTxtParcela	204
Figura 150. Herramienta AsignaTurno.....	204
Figura 151. Asignación de turnos de riego	205
Figura 152. Reporte de nodos del sistema.	205
Figura 153. Proceso de ejecución de la herramienta DepuraRed.....	206
Figura 154. Herramienta DEFINERED.....	206
Figura 155. Herramienta OPTIMIZARED	206
Figura 156. Herramienta CreaNP.....	207
Figura 157. Herramienta Área/Turno.....	207
Figura 158. Reporte de tuberías	207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos según versiones del programa GESTAR.....	19
Tabla 2. Opciones de licenciamiento de IriPro.....	24
Tabla 3. Variables climatológicas para la estación el rodeo. (Fuente: IMTA 2002).....	32
Tabla 4. Características de la bomba	32
Tabla 5. Características del agua para riego	32
Tabla 6. Resultado del análisis de suelos para el ejido Mazatepec (Fuente: IMTA 2002)	34
Tabla 7. Análisis químico de los suelos (Fuente: IMTA 2002).....	34
Tabla 8. Resumen de características físicas del suelo.	34
Tabla 9. Requerimiento de riego máximo	35
Tabla 10. Parámetros obtenidos del diseño agronómico.....	36
Tabla 11. Funciones de diseño de sistemas	45
Tabla 12. Ingreso de materiales y accesorios.....	46
Tabla 13. Ingreso de datos de elevación.....	46
Tabla 14. Diseño de línea secundaria	46
Tabla 15. Trazo de red principal.	47
Tabla 16. Asignación de turnos.	47
Tabla 17. Diseño de diámetros de red principal.....	47
Tabla 18. Archivos de presentación de materiales.....	47
Tabla 19. Formatos de exportación de planos.	48
Tabla 20. Requerimiento de hardware y software.	50
Tabla 21. Cantidad de mano de obra y costo de programas utilizados.	52
Tabla 22. Entidades del proyecto.	61
Tabla 23. Privilegios para los diferentes usuarios de la aplicación.....	65
Tabla 24. Automatización vía radio de una obra de riego por goteo.	109

I. Objetivos

i. Antecedentes

Una de las principales actividades de la subcoordinación de Ingeniería de Riego ha sido el diseño y operación de sistemas de riego parcelario en diversas regiones agrícolas del país. Sin embargo, dichas actividades se realizan usando herramientas convencionales que han sido mejoradas y perfeccionadas en la última década.

Los avances en las tecnologías de la información, comunicación, equipo instrumental y computacional han facilitado las tareas asociadas al diseño, operación, aplicación y evaluación del riego a nivel parcelario, por lo que se requiere de una revisión de estado de arte y la adaptación de componentes, métodos y herramientas informáticas e instrumentales existen para incorporarlos en los proyectos de ingeniería de riego que realiza el IMTA, a fin de mejorar los tiempos de respuesta y la calidad de los trabajos demandados por los usuarios y módulos de riego del país.

Las tecnologías más innovadoras que se han desarrollado para hacer los sistemas agrícolas más productivos, eficientes o precisos, están asociadas a la llamada agricultura de precisión, que incorpora avances en percepción remota, comunicación inalámbrica y sistemas de información, así como riego el perfeccionamiento continuo de equipos para la aplicación diferencial de los insumos agrícolas, y el uso de sensores y sistemas de adquisición automática de datos para el monitoreo espacial y temporal de variables agrícolas y la automatización de actividades agropecuarias como el servicio de riego. Mediante la agricultura de precisión el agua es aplicada diferencialmente de manera precisa, no de manera indiscriminada en una superficie como tradicionalmente se hace, sino de manera puntual, acoplando las necesidades hídricas del cultivo con la aplicación mediante el riego, atendiendo las características de variables edáficas, climáticas y del cultivo.

En esta vertiente, el perfeccionamiento hidráulico, instrumental y agronómico en el diseño de los sistemas de riego ha mejorado la eficiencia en el uso del agua y su aplicación. Para implementar una agricultura de precisión, es necesario integrar herramientas computacionales que favorezcan la adaptación de tecnologías para la automatización, control y operación del riego programado, tales como la adopción de sistemas computacionales para el adecuado diseño del sistema de riego, la calendarización del riego en tiempo real y automatización del servicio de riego con dispositivos precisos de entrega volumétrica del agua a nivel parcelario.

Ante la variedad de programas computacionales existentes en el mercado para diseños de sistemas de riego se requiere de una evaluación de su desempeño para seleccionar el mejor programa para las necesidades del IMTA, que permitan mejorar e integrar las tareas y procesos asociados a las actividades de

diseño de sistemas de riego. Para seleccionar el mejor programa computacional para el diseño del sistema de riego es necesario una comparación técnica entre los programas computacionales más usados para establecer ventajas o desventajas de acuerdo a indicadores de desempeño.

El calendario de riego de los cultivos, por otra parte, se establece atendiendo principalmente condiciones del clima y cultivo promedio, no obstante en grandes extensiones dichas condiciones pueden presentar alta variabilidad en tiempo y espacio y en consecuencia la aplicación del agua en forma de riego también exige una calendarización precisa del riego de acuerdo a las necesidades de los cultivos; para un mejor acoplamiento del riego, en respuesta a la variabilidad de las necesidades hídrica de los cultivos, es preciso aplicar el agua de riego en forma diferencial usando información climática de manera automatizada e información del desarrollo de los cultivos y así calendarizar el riego con mayor precisión en tiempo real, apoyado en los avances recientes en tecnologías de información e instrumental agronómico.

Otro factor importante en la mejora continua del manejo de los sistemas de riego es la confiabilidad del servicio de riego. Para lo cual se requiere contar con sistemas de entrega volumétrica parcelario que permita la entrega y seguimiento automatizada del riego a través de hidrantes con activación y monitoreo remoto. Ante la necesidad de incorporar componentes para la aplicación del riego con precisión, el IMTA requiere el desarrollo de aplicaciones para mejorar el diseño de sistemas de riego, la calendarización del riego y el desarrollo de hidrantes parcelarios para la entrega volumétrica a nivel parcelario.

i. Objetivos generales

Evaluar el desempeño de tres programas informáticos comerciales para el diseño de sistemas de riego presurizados y definir criterios de selección para su uso en las condiciones agrícolas de México.

Desarrollar una aplicación informática para la calendarización del riego en tiempo real donde se puedan hacer actualizaciones automatizadas de la información meteorológica vía internet.

Conocer el funcionamiento de un dispositivo de entrega volumétrica automatizado (GOOTEM), y su potencial para implementarse en Distritos de Riego en México.

Divulgación de los resultados mediante documentos que soporten la información generada durante este proyecto; bibliográfica, "state of the art", experimental, trabajo de campo, etc.

II. Resultados Obtenidos

La agricultura de precisión gana superficie; dos razones son: por un lado un acelerado desarrollo tecnológico en temas informáticos que permiten la transmisión y procesamiento de una gran cantidad de datos de manera remota y por otro la necesidad del uso equilibrado de los recursos, en este caso aplicados en la agricultura.

La discretización del terreno agrícola, y la aplicación diferenciada de insumos tomando en cuenta las deficiencias puntuales que en esa discretización se identifiquen, es una interpretación adecuada de la agricultura de precisión. Hablando específicamente del recurso agua, el primer paso para su aplicación consiste en un adecuado cálculo de las necesidades hídricas del cultivo, su calendarización y contar con dispositivos capaces de hacer esta entrega.

El diseño del sistema de riego comienza con la selección de una metodología confiable en el proceso de diseño. Una vez definido el sistema de riego, la calendarización del riego, significa la operación y gestión del sistema para el uso eficiente del mismo. Los puntos de entrega de agua son los nodos críticos y la entrega medida garantiza, entre otras causas el adecuado funcionamiento del sistema como un todo.

En este documento se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto; se evaluaron tres programas comerciales para el diseño de riego presurizado: IRRICAD, WCADI, IrrigaCAD e IriPro; Se analizó su desempeño con base a normas internacionales especializadas en evaluación de software. Se evaluó la calidad interna y externa, así como la calidad de uso.

Entre los resultados obtenidos: IRRICAD, WCADI e IriPro cuentan con su propio entorno gráfico, mientras que IrrigaCAD se auxilia de AutoCAD Civil 3D. El mejor desempeño gráfico, hidráulico, de diseño, etc lo tiene IRRICAD.

Se desarrolló y validó una aplicación informática para la calendarización del riego en tiempo real, con base a información climatológica que alimenta el sistema de manera automática vía internet.

Se realizó la revisión del dispositivo de entrega volumétrica (GOOTEM) el cual se pretende instalar y adaptar a las condiciones locales de un Distrito de Riego en el estado agrícola de Sinaloa.

De las revisiones realizadas en este proyecto se redactó un artículo científico y se presentaron dos congresos, uno nacional y uno internacional. Así mismo, se cuenta con un documento sobre el pronóstico del riego

**REVISIÓN, PRUEBA Y APLICABILIDAD DE PROGRAMAS
COMPUTACIONALES COMERCIALES PARA EL DISEÑO DE
SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO**

1.1 El riego en México

El agua ha sido de gran importancia en el desarrollo del hombre, a partir de su aparición en la tierra su preocupación principal fue la de buscar agua para satisfacer sus necesidades, por lo que emigró a lugares fértiles donde ésta se encontrara en abundancia. En la medida que el hombre utilizaba el agua para sus actividades diversas, se dio cuenta del problema que se presentaba cuando esta se encontraba sin control, lo que lo llevo a desarrollar obras que tenían como misión beneficiarle en relación con sus necesidades del agua.

México aún antes de la conquista ya había fincado su tradición en la construcción de obras hidráulicas. A la llegada de los conquistadores encontraron las chinampas de Xochimilco, los jardines de Texcoco, Iztapalapa y Huastepec. Los acueductos traían agua de los manantiales de Chapultepec, y de las fuentes de Coyoacán, entre otras obras destinadas al manejo del agua.

Durante la época colonial dentro de las acciones encaminadas al desarrollo del riego en el país destacan las obras hidráulicas de la laguna de Yuriria, no obstante en el siglo XIX se presentaron graves quebrantos políticos y económicos que provocaron el estancamiento en la construcción de obras de riego.

En el México independiente ocurrieron cosas similares al periodo anterior, en los años de gobierno del porfiriato, el gobierno otorgo concesiones a empresas colonizadoras e irrigadoras, y de aquí fue que surgieron los primero canales de riego en el valle de Mexicali, obras para el aprovechamiento de aguas de estiaje de los ríos Sinaloa, Culiacán y San Lorenzo, otra obra importante fue la derivación del rio Nazas para irrigar terrenos de la región lagunera.

Los distritos de riego son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación, e incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros (SRH, 1976).

Los Distritos de riego fueron ideados y construidos por el Gobierno Federal, y una vez que entraron en operación el propio Gobierno se encargó de su administración, operación y mantenimiento. Las Unidades de riego son infraestructuras que en algunos casos construyeron los propios usuarios, pero la mayoría de ellos fueron construidas por los gobiernos Federal o Estatal, pero a diferencia de los Distritos, al entrar en operación fueron transferidas a los usuarios organizados. Las Unidades de Drenaje son áreas localizadas en zonas con un buen régimen de lluvia, donde por lo general las precipitaciones provocan que los terrenos agrícolas y pecuarios tengan excesos de humedad. El Gobierno Federal construyó la infraestructura de estas unidades, que consiste en una red de drenaje y caminos para desalojar el exceso de humedad. (Rendón, 2001).

Con la creación de la Comisión Nacional de Irrigación y la SRH para el año de 1975, se encontraban bajo riego 3 millones 327 mil hectáreas en todo el país

(Jiménez et al., 2010).

La superficie agrícola regada total en el país según UNAM (2011) no tuvo crecimiento en el periodo de 1988 hasta el año 2007, a pesar de la cantidad de obras de riego que se construyeron, incluyendo presas de almacenamiento, derivadoras, plantas de bombeo y pozos profundos. La superficie regada en los distritos de riego ha disminuido como se muestra en la Figura 1; en cambio ha aumentado notablemente la superficie regada en las unidades de riego, compensando la disminución en distritos.

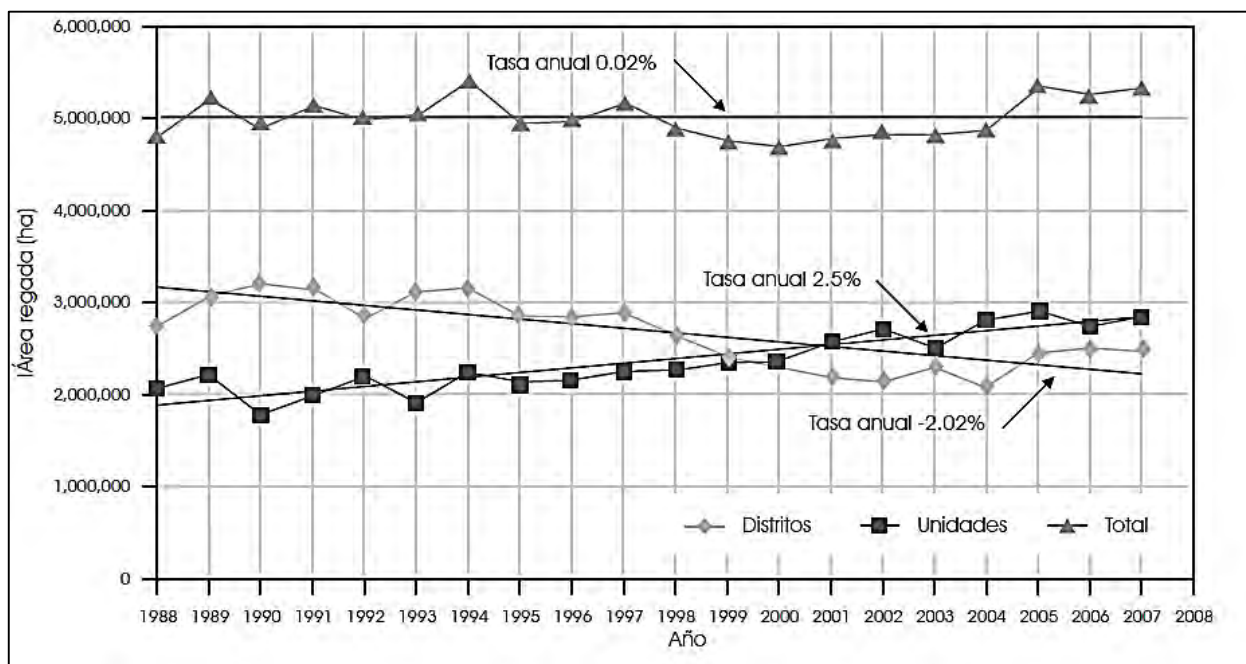


Figura 1. Variación de las áreas regadas en distritos y unidades de riego en México.
(Fuente: UNAM, 2011)

La agricultura de riego ha sido privilegiada y su importancia ha sido relevante por las políticas agrícolas desde hace casi un siglo, lo que ha acarreado grandes subsidios a los productores de riego, para que no tuvieran que pagar el agua a su costo económico y menos a su costo de oportunidad.

No obstante, el subsidio ha propiciado el uso desmedido del recurso, consecuencia de la ineficiencia de los métodos de riego y de la irresponsabilidad de los productores. El resultado es un agotamiento progresivo de los mantos freáticos, incremento en el abatimiento de los pozos y consecuentemente costos de bombeo crecientes, asolvamiento y salinización de presas y mantos acuíferos en los distritos de riego, inundaciones por desfogue de represas en las cuencas bajas, etcétera. Ante la disminución paulatina del acceso de la población urbana al agua (alrededor del 51 %), es imprescindible limitar el consumo de agua para la agricultura, primera consumidora del precioso fluido. Para ello, existen soluciones tecno-económicas que sólo requieren de apoyos financieros públicos (en forma de créditos y algunos subsidios temporales) y de capacitación de los productores

en la aplicación del riego (Bonilla y Mestries, 2010).

Actualmente no hay suficiente control sobre la distribución, aprovechamiento y uso del agua; la ley de aguas nacionales y su reglamento aún tienen fallas, como la falta de definición de lo que es un derecho de agua. En muchos casos los usuarios del agua de riego no tienen la adecuada seguridad jurídica sobre los volúmenes que tienen concesionados.

Aumentar las zonas de riego sin que se tenga suficiente agua disponible es atentar contra los derechos que tienen los usuarios sobre el agua, que se afectan con las disminuciones. Esta situación se está presentando en varias cuencas sobreexplotadas y es una de las razones por las que el agua superficial ha disminuido para el riego agrícola.

Es necesario medir el agua durante su distribución, no solamente para el uso agrícola, sino también para otros usos, a fin de lograr la distribución equitativa del recurso y para asegurar el cumplimiento de la ley y su reglamento (UNAM, 2011).

1.1.1 Superficie regada en México

Las posibilidades de practicar agricultura intensiva bajo condiciones de temporal son muy limitadas, debido a que poco más de las dos terceras partes del territorio nacional son áridas y semiáridas, y la topografía montañosa, hacen poco frecuente la combinación de suelos aptos y agua suficiente para la agricultura. Este hecho justifica la construcción de obras hidráulicas para promover la expansión y modernización de la producción agrícola. (Quijada, 2008).

El mayor uso del agua en México es agrícola. Con base en el VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (el último disponible a nivel nacional) la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.22 millones de hectáreas, de las cuales 18% era de riego y el resto tenía régimen de temporal. La superficie sembrada anualmente (considerando el año agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) ha variado entre 21.8 y 22.1 millones de hectáreas durante el periodo 2008-2012. México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.5 millones de hectáreas, de las cuales el 54% corresponde a 85 distritos de riego, y el restante a más de 39 mil unidades de riego (CONAGUA, 2013).

El subsector irrigación está integrado por dos sistemas, los distritos de riego y las unidades de riego, se diferencian por la fuente y el tamaño de los aprovechamientos; pero sobre todo por la forma de organización económica y social, así como el papel que juegan en las instituciones gubernamentales cada uno de ellos. El volumen de agua distribuido a los usuarios de riego se clasifica por el origen de la fuente de abastecimiento, este puede ser por gravedad subdividido en presas de almacenamiento y presas de derivación; y por bombeo el cual puede ser de una corriente (manantiales, ríos) y pozos profundos. (Quijada, 2008).

Los distritos de riego y las unidades de riego consideraron la tecnología prevaleciente en la época de su diseño para la aplicación del agua por gravedad en las parcelas. En muchos casos sólo se construyeron las redes de canales y drenes principales, quedando las obras parcelarias a cargo de los usuarios. Esto, sumado al deterioro de la infraestructura, acumulado en varias décadas por la insuficiencia de recursos económicos para su conservación y mejoramiento, propició una baja en la eficiencia global del manejo del agua. Cabe destacar que el rendimiento de la superficie bajo régimen de irrigación es superior al correspondiente a la agricultura de temporal. En 2012 para los cultivos por superficie cosechada, el maíz en grano, sorgo en grano y frijol, su rendimiento bajo riego, medido en ton/ha, fue de 2.2 a 3.3 veces mayor que el de los cultivos de temporal. (CONAGUA, 2013).

Según el sistema de información global sobre el agua (AQUASTAT), desarrollado por la división de tierras y aguas de la FAO (2014), la superficie equipada para el suministro de agua (mediante riego) a los cultivos en México para el año 2009 fue de 6.46 millones de hectáreas, de estas 5.168 millones se regaron con sistema de riego superficial (riego por surcos, por tablares, por compartimientos y por sumersión), por lo que las restantes tiene algún sistema de riego presurizado ya sea por aspersión, microaspersión o goteo principalmente. Por lo que el 80% del área irrigada en México consiste en riego por gravedad y el 20% por algún método de riego presurizado.

1.2 Diseño de los sistemas de riego presurizado

En México, el uso de los sistemas de riego presurizados ha traído un incremento en la producción y uso eficiente del agua. En consecuencia, el diseño y funcionamiento de estos sistemas tiene una importante función en la producción de los cultivos. (Buendía et al., 2004)

Para que un sistema de riego presurizado opere con alta eficiencia de aplicación debe cumplirse con al menos cuatro condiciones:

1. Diseñar el sistema de riego en forma correcta, esto es, que pueda satisfacer la demanda del cultivo durante la época de máxima demanda evapotranspirativa, con la mayor uniformidad posible y consecuentemente una alta eficiencia de aplicación.
2. Construir el sistema con materiales de buena calidad.
3. Operar el sistema de riego a la presión especificada en el diseño con objeto de que el emisor opere en forma óptima.
4. Operar el sistema de riego en los tiempos definidos para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo en cada etapa fisiológica.

Si alguna de estas condiciones no se cumple o se cumple en forma parcial, el sistema de riego no podrá alcanzar su máxima eficiencia de aplicación y en consecuencia, el productor no podrá obtener el máximo beneficio del sistema (IMTA, 2010).

El perfeccionamiento del riego obliga a asimilar las nuevas tecnologías para el diseño y la construcción de los sistemas, mejorar la eficiencia de utilización del agua y la energía, permitir una adecuada mecanización y automatización de la aplicación del agua y demás labores agrícolas, utilizar racionalmente los recursos hídricos de modo que garanticen su propia existencia y la del medioambiente (Arviza et al., 1995).

Un aspecto importante para lograr un eficiente manejo de los sistemas de riego presurizado lo constituye el adecuado diseño de los mismos y ello, está estrechamente relacionado con el diseño hidráulico de la red de tuberías. Con el desarrollo de la informática, la hidráulica de los sistemas de tuberías se vio beneficiada al usar herramientas numéricas y computacionales para la solución de las tareas planteadas (Medina, 2005 citado por Rivera, 2012).

1.2.1 Etapas para el del diseño de los sistemas de riego.

Los datos de inicio para el diseño de un sistema de riego son: factores de la producción vegetal; suelo, clima, y cultivo; características del agua de riego. A partir de estos datos se debe tomar ciertas decisiones desde el punto de vista técnico y económico (Pascual, 2008).

El diseño de riego puede dividirse en dos fases:

a) Diseño agronómico, debe garantizar el suministro de las necesidades hídricas del cultivo (en la condición de mayor demanda) con una adecuada eficiencia de aplicación, asegurando un apropiado crecimiento y desarrollo.

El diseño hidráulico abarca:

El cálculo de las necesidades totales de riego.

La determinación de la dosis.

b) Diseño hidráulico, debe asegurar el diseño óptimo de la red, con el fin de cumplir con los requerimientos resultantes del diseño agronómico. Intervienen nuevos datos de partida, como la topografía y varios parámetros opcionales que se basan en criterios técnico-económicos.

El diseño hidráulico comprende:

El tiempo y frecuencia de riego, que depende de la selección de tipo y del número de emisores por planta (unidad e superficie), caudal y disposición.

Las dimensiones de la red de distribución y su forma de operación.

Aquí es donde se definen tanto los costos del sistema como los costos de operación.

1.3 Programas informáticos comerciales para el diseño de riego presurizado

1.3.1 WCADI

Weizman Irrigation Ltd se constituyó en 1980 y fue creado bajo el concepto de una solución completa, un paquete de diseño y manejo de riego, entrando de manera comercial en 1983 en su primera versión. El programa WCADI ha sido utilizado para resolver problemas de riego de grandes proyectos con una solución integral, así como sistemas individuales para problemas específicos de diseño en el área de la planeación del riego.

Los resultados y la retroalimentación obtenida a partir de los proyectos diseñados con el programa WCADI, se plantea como una aplicación con alto nivel de adaptabilidad a las diversas condiciones de proyectos.

La versión actual de WCADI maneja proyectos y casos múltiples (también llamadas "redes") dentro de cada proyecto. Para ser capaz de proponer una red viable WCADI requiere de datos como el plano topográfico del terreno, las necesidades de agua del cultivo, el costo de las tuberías y equipo de bombeo.

WCADI cuenta con una herramienta que permite duplicar parte de los datos de un proyecto, como el archivo de materiales que puede ser elaborado desde cero o se puede importar si el proveedor pone a disposición su base de datos. Estos datos se agrupan en tablas de manera que se puedan definir grupos globales de materiales, así como todos los detalles necesarios sobre el diámetro del tubo, emisores, etc. (WCADI, 2012).

WCADI recomienda seguir un procedimiento para diseño, con el fin de llevar a cabo un proyecto en menor tiempo posible. Para contribuir a este proceso, el flujo de datos en WCADI se muestra esquemáticamente en la Figura 2 y los pasos básicos para utilizar el programa se enlistan en el orden adecuado.

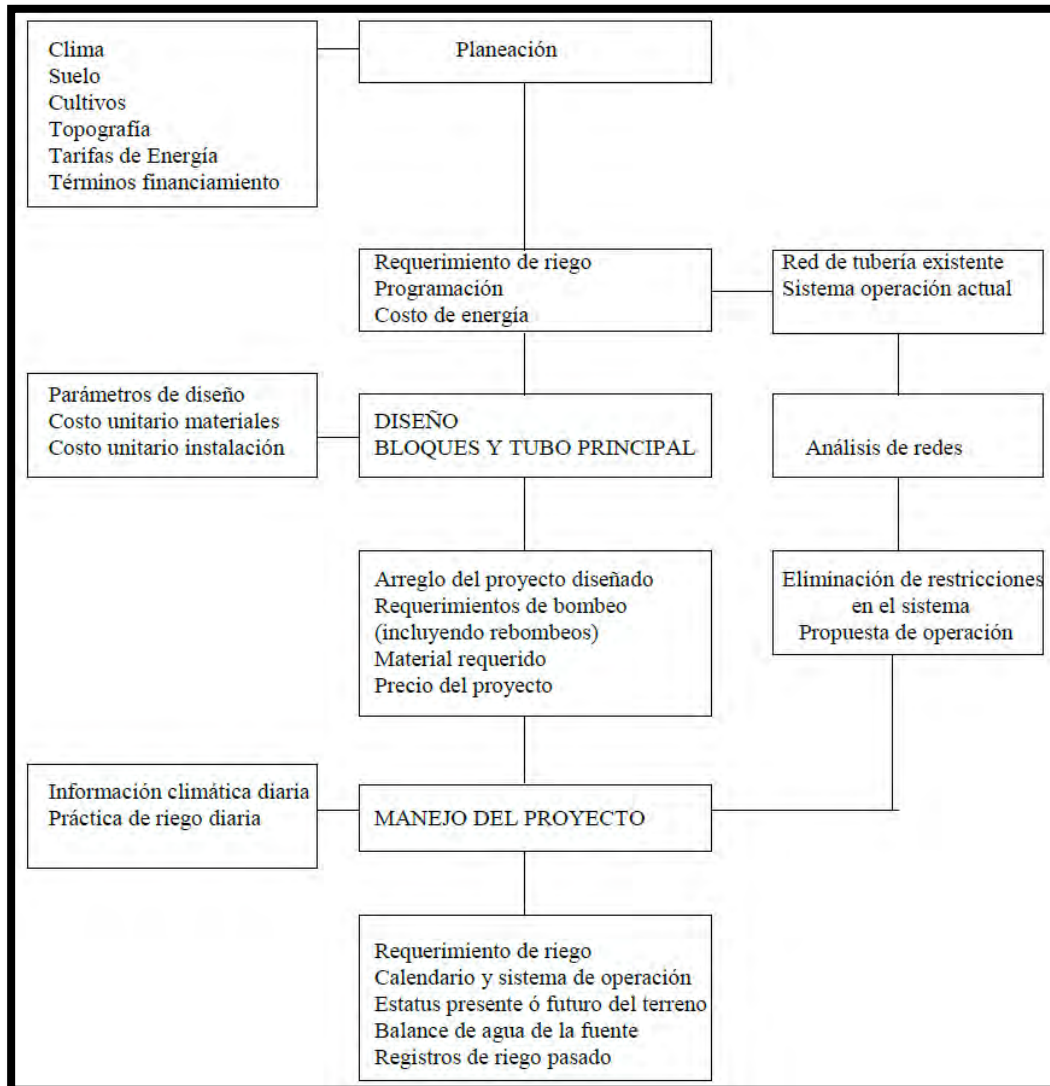


Figura 2. Proceso de diseño en WCADI (Fuente: WCADI, 2012)

1.3.2 GESTAR

Es un paquete informático para la ingeniería hidráulica de sistemas de riego a presión (redes de distribución y sistemas de aplicación del riego en parcela), que permite su diseño, ejecución y gestión, mediante la selección de recursos disponibles y la trayectoria de innovaciones y aplicaciones a grandes y pequeños sistemas. (<http://www.acquanalyst.com/>, 2014).

Las características principales del programa son:

Módulos de optimización, análisis hidráulico y energético en un mismo entorno.

Herramientas de optimización para redes ramificadas con múltiples opciones, protocolos y herramientas para encontrar soluciones con reducciones de costes del sistema.

Módulo hidráulico desarrollado con capacidades de análisis inverso, tratamiento de elementos de baja resistencia y válvulas reguladoras, modelización de

emisores puntuales y ramales emisores con caudal emitido dependiente de la presión, curvas características de bombas con puntos de inflexión, modelización de estaciones de bombeo directo.

Entorno gráfico interactivo de uso intuitivo.

Integración de módulos y herramientas en un entorno gráfico interactivo de uso intuitivo y con comunicación, utilizando standard ACCESS como intermediario, con todo tipo de sistemas CAD/GIS o programas terceros, a lo que se unen utilidades para la comunicación bidireccional con AUTOCAD. Exportación de líneas y nodos a EPANET.

Disponibilidad de bases de datos para tuberías, válvulas, pérdidas singulares, aspersores, ramales de goteo, fluidos, tarifas eléctricas, bombas.

Tabla 1. Elementos según versiones del programa GESTAR.

Elemento	Educativa	Profesional	Premium
Nodos Unión	25	100	3000
Demanda Conocida	20	100	3000
Hidrantes Reguladores	7	7	3000
Embalses	2	10	300
Balsas	2	10	300
Presión Conocida	2	10	300
Emisores	20	20	300
Nodos Libres	5	5	300
Nodos Doble Condición	5	5	300
Tuberías	30	125	3000
Líneas de Emisores	20	20	300
Válvulas	7	7	300
Bombas(análisis/regulación)	5/3	5/3	300
Elementos Libres	5	5	300
Vértice Polilíneas	300	300	300

1.3.3 IRRICAD

El programa de computo IRRICAD es desarrollado por AEI Software, es la división de desarrollo de programa de Lincoln Agritech Ltd, propiedad de la Universidad de Lincoln en Canterbury, Nueva Zelanda, inicio sus actividades comerciales en 1988. El programa ha sido desarrollado por ingenieros de riego y programadores, lo que ha permitido una aplicabilidad acorde con las necesidades de los cultivos. Dimensiona automáticamente tuberías para satisfacer las especificaciones de presión y velocidad, el programa genera advertencias cuando se exceden los rangos o valoraciones sobre estas especificaciones. La base de datos de IRRICAD tiene la capacidad de incorporar diversas marcas o modelos de productos de riego. Lincoln Agritech Ltd invierte en el continuo desarrollo del programa y en apoyo técnico permanente para los usuarios de IRRICAD.

El programa de computo IRRICAD combina las ventajas de dibujo CAD con una base de datos de hidráulica en la que se incluye el tamaño y las técnicas de análisis de redes, proporciona la selección automática de accesorios de tuberías, generando una lista completa de materiales, es capaz de reducir en segundos una serie de informes hidráulicos que tomaría horas para calcular manualmente. El programa presenta pantalla con interfaz integrada para facilitar la entrada de la información del proyecto, dimensionamiento automático de tubería principal y secundaria, selección automática y generación de lista de materiales, importación y exportación de archivos de imágenes y archivos de AutoCAD, subdivisión de grandes áreas de riego, representación visual de errores en los datos importados.

IRRICAD puede ser utilizado para el diseño de cualquier sistema de riego presurizado, requiere una base de datos que cuente con los elementos hidráulicos y sus propiedades hidráulicas necesarios para el diseño (Lincoln Ventures Ltd, 2009).

IRRICAD tiene la capacidad de diseñar:

- Aspersión
- Micro-Aspersión
- Goteo / Cinta de goteo
- Viveros
- Supresión de polvo
- Redes principales
- Sistemas de abastecimiento de agua
- Césped Residencial y Comercial
- Campos deportivos / Campos de Golf
- Sistemas presurizados por gravedad (Multicompuerta)
- Evaluación de sistemas ya establecidos

Para el diseño de riego mediante el programa IRRICAD, idealmente se recomienda el siguiente procedimiento:

- Ingresar base de datos de los materiales de diseño
- Ingresar información de fondo (límites de propiedad, construcciones y datos de elevación)
- Trazo del sistema (fuente de abastecimiento, válvulas, red principal y secundaria, laterales de riego).
- Gestión y Diseño; Introducir la información de gestión del sistema (gasto disponible, turnos y tiempo de riego), y realizar el diseño hidráulico.
- Costo; seleccionar accesorios y generar una lista de materiales.
- Impresión; Impresión de los planos e informes del diseño.
- IRRICAD evalúa el funcionamiento de los sistemas mediante tres utilerías:
- Salidas operando dentro del rango preciso
- Tamaño adecuado de tuberías suficiente caudal y presión por parte de la fuente de abastecimiento

La Figura 3 ilustra los componentes básicos que permiten un diseño con el programa IRRICAD. Siguiendo esta filosofía, es posible la solución a diseños más

grandes y complejos.

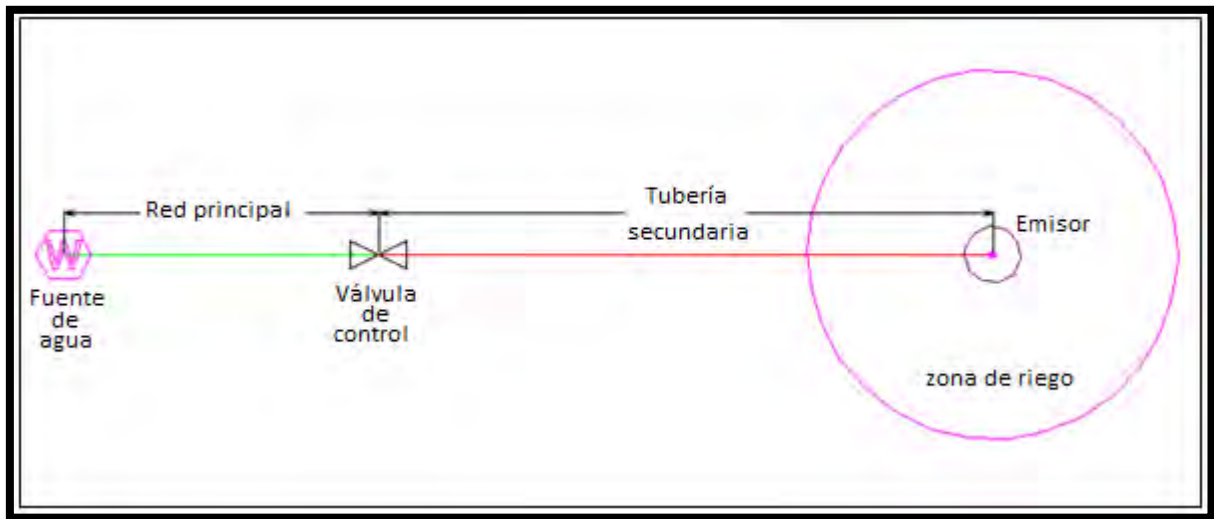


Figura 3. Esquema básico de diseño en IRRIGACAD.

(Fuente: Lincoln Ventures Ltd, 2009)

1.3.4 IRRIGACAD

IrrigaCAD es un programa de cómputo que conjunta de funciones para el cálculo, diseño y cuantificación de material para riego presurizado, está desarrollado como un complemento que trabaja con Autodesk AutoCAD 3D y/o Microsoft Excel, así como la generación de los archivos INP de trabajo para EPANET; La protección se realiza mediante tecnología de llave de acceso HASP de SafeNet, Inc.



Figura 4. Programa de diseño IrrigaCAD

IrrigaCAD V 3.2 Diseño de sistemas de riego en ambiente gráfico (Civil 3D), cuenta con un sistema que procura reutilizar al máximo la edición del dibujo y la configuración de los proyectos, de tal forma que se disminuye el reproceso en modificaciones a proyectos de riego.

IrrigaQty: Recuento de materiales automatizado, en este caso el algoritmo está diseñado para que tome decisiones de los materiales que existen en los nodos, tomando en cuenta las tuberías seleccionados por el proyectista para la red hidráulica.

1.3.4.1 Requisitos de IrrigaCAD

Para el correcto desempeño del programa de cómputo incluido en los materiales con licencia son necesarios se cumpla con los siguientes requerimientos mínimos:

- Windows Vista, 7 u 8 de 32 o 64 bits
- Autodesk AutoCAD Civil 3D 2011 o 2013
- Microsoft Excel y Access 2010 o 2013
- EPANET 2.00.12 (programa para el análisis de sistemas de distribución de agua)

El uso de este programa es dirigido a profesionales de la hidráulica o agrónomos con conocimientos en ingeniería de riego, por lo que se considera que conocen las bases agronómicas e ingenieriles para el desarrollo paso a paso.

El diseño de sistemas de riego es un trabajo intelectual que tiene las siguientes fases:

1. Diseño agronómico
2. Definición del sistema de riego
3. Definición del material a utilizar
4. Diseño hidráulico
5. Recuento de materiales

El diseño agronómico no está dentro de las capacidades del programa, por lo que se considera que el proyectista tiene los conocimientos necesarios para definir el tipo de sistema de riego, uso consuntivo, selección del emisor más apropiado, fundamentales para el proyecto de riego.

La definición del sistema de riego es uno de los factores más importantes desde el punto de vista de concepción del proyecto de riego. Es donde se realiza el diseño funcional del sistema, es la parte creativa del proyectista, donde define la distribución de las válvulas de seccionamiento, las secciones de riego y la operación general del sistema de riego, IrrigaCAD no pretende realizar esta parte pero si da elementos para el seccionamiento del terreno y por consecuencia del diseño funcional del sistema de riego.

En este programa se considera que el usuario del sistema tiene la capacidad para tomar decisiones sobre el proyecto de riego, el sistema procura dar la suficiente información para que el usuario tome tales decisiones cuando el sistema detecta falta de información, se interrumpe para pedir al usuario esta, siendo responsabilidad total del mismo el tomar las decisiones apropiadas, se le da al proyectista control absoluto sobre los materiales con los que desea trabajar.

1.3.5 IrriPro

IrriPro es un programa para diseño de riego desarrollado por la empresa IRRIWORKS, fundada por ingenieros y agrónomos de la Universidad de Palermo basado en un algoritmo que permite diseñar y analizar sistemas de riego presurizado incluyendo aspersión y riego localizado (goteo y microaspersión) de cualquier tamaño y geometría. El software de diseño de riego IrriPro ofrece al personal técnico herramientas capaces de instalar un sistema en cualquier tipo de terreno.

El programa IrriPro integra herramientas que permiten:

- Calcular y obtener resultados de: descarga, velocidad, pérdida de presión en cada tubo, Altura de piezométrica y de presión en cada nodo
- Diseñar la red y el perfil hidráulico
- Optimizar el uso de agua y fertilizantes

IrriPro puede obtenerse en diferentes versiones y costos con diferentes capacidades, dependiendo de las necesidades. Puede rentarse por tiempo

determinado tanto la versión Light como la Bigfarm o comprarse una licencia permanente de ambas. En la siguiente tabla se ven las diferentes opciones de licenciamiento de IriPro.

Tabla 2. Opciones de licenciamiento de IriPro.

	FREEWARE*	EDUCATIONAL	LIGHT	BIGFARM	LIFETIME
Nº emitters per project	3.000	20.000	20.000	100.000	100.000
Nº sectors per project	3	10	10	Unlimited	Unlimited
Database	Partial	Partial	✓	✓	✓
Google Maps Detected points	100 points	2500 points	2500 points	2500 points	2500 points
Google Maps (Survey size and map side)	9 [Ha] 300[m]	144 [Ha] 1.200[m]	144 [Ha] 1.200[m]	600 [Ha] 2.500[m]	600 [Ha] 2.500[m]
License period	No Limit	6 months	10days - 1year	10days - 1year	No Limit
Distance learning**	✗	✗	✓	✓	✓
Customer care Tech.support	✗	✗	License period	License period	1 year
Upgrades	✗	✗	✗	✗	1 year

IriPro integra una base de datos de materiales disponibles en el mercado (tubos de emisores, emisores, piezas especiales) que muestra las características geométricas e hidráulicas de los emisores (curvas características, descarga y presiones nominales).

La versión Freeware puede bajarse de la página de IriWorks y tiene las siguientes limitantes.

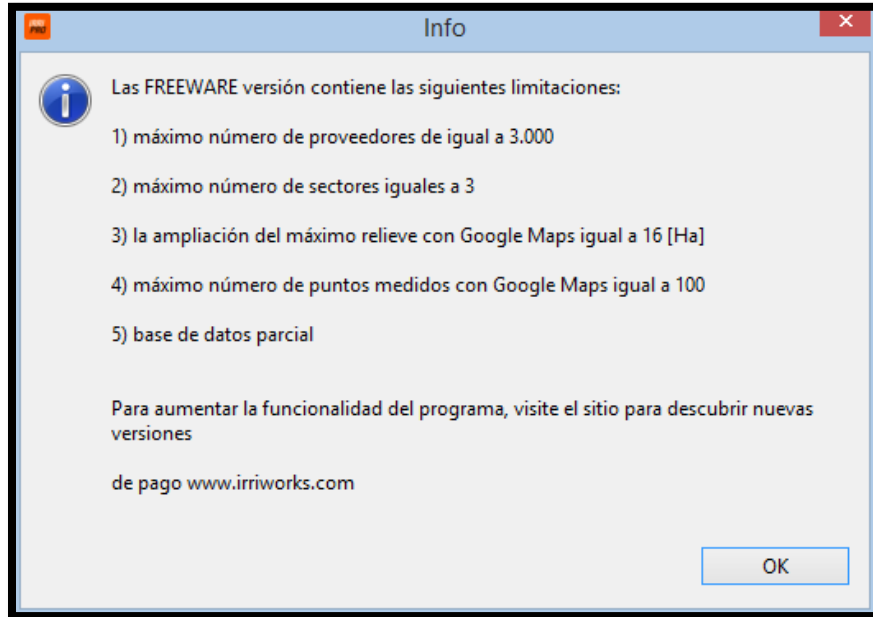


Figura 5. Limitaciones de la versión Freeware de IrriPro.

Las versiones disponibles en el momento son la 3.1.2 y la 3.5 en beta. IrriPro tiene la capacidad de utilizar información proveniente de Google Earth y Google Maps para trazar contornos y elevaciones. La calidad del proyecto depende de la precisión de los datos obtenidos, generalmente puede usarse para anteproyectos y afinarse con información de levantamientos detallados.

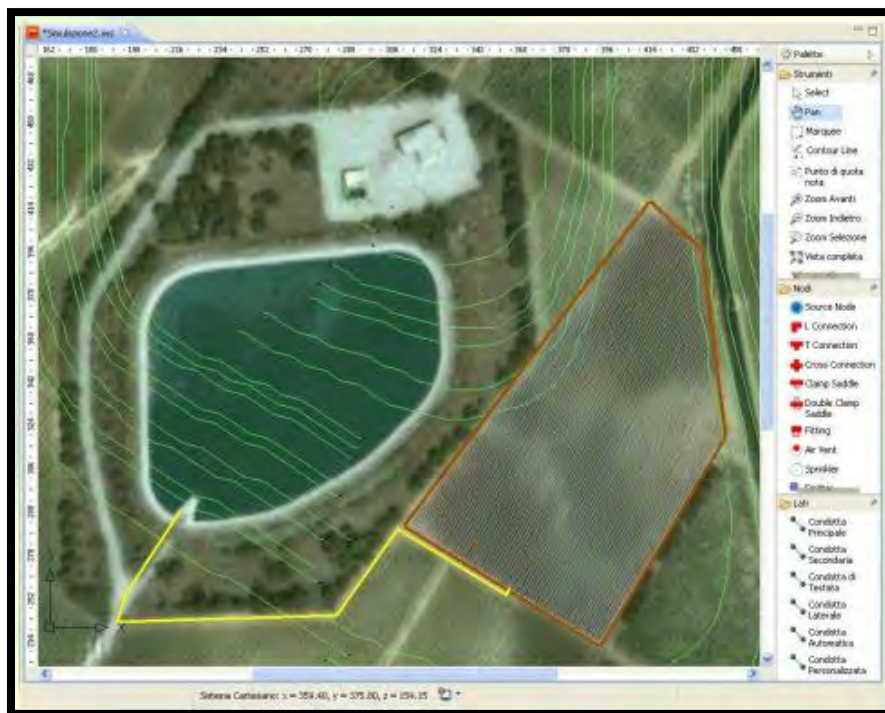


Figura 6. Utilización de Google Earth para trazo y elevaciones.

IrriPro tiene la opción de usar un Wizard que lleva paso a paso al diseñador para acelerar el proceso de diseñadores primerizos o que usan el programa con poca frecuencia.

Agregar nuevos sectores

Sector Nr. 1: Nodo de alimentación del sector y disposición cultural

Asociar un nodo de alimentación al sector

Nodo de alimentación del sector

Asociar al sector un nodo de alimentación

Area de dibujo

Temperatura agua de irrigación

T 20.0 [C]

Disposición cultural

Entrehilera y espaciamento

a1: 1.0000 [m] δ1: 1.0000 [m]

Sesto de instalación

L1: 0.01 [m] L2: 0.01 [m]

Regulador cada : 1 Nr. plantas

Ala de dispensación cada : 1 Nr. hileras de plantas

Otros sesti d'instalacion

< Back Next > Finish Cancel

Figura 7. Pantalla inicial del Wizard.

IrriPro puede importar archivos tipo raster como planos escaneados o fotos, o

vectoriales tipo CAD, tanto dwg como dxf para incorporarlos en el diseño.

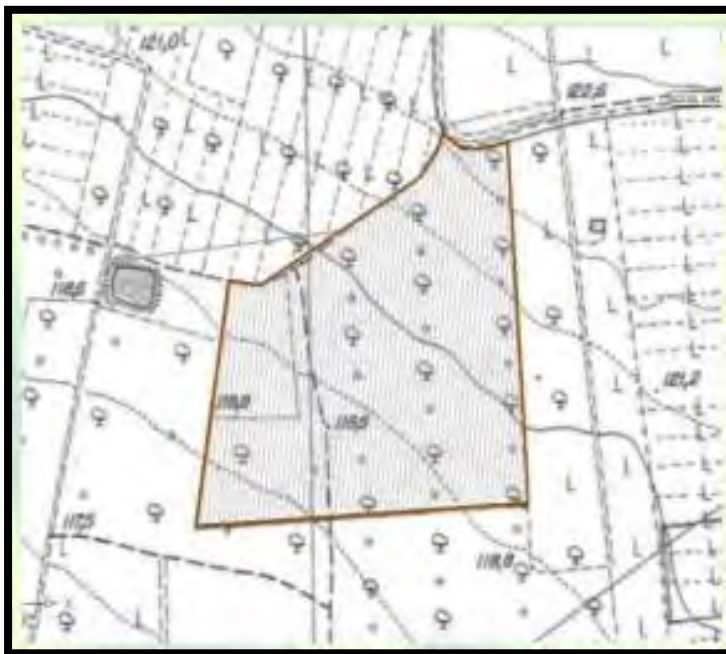


Figura 8. Importación de archivos CAD.

IrriPro incorpora una tecnología que llamo INDO (Irrigation Network Data Object) con la cual no solo se dibujan líneas y puntos sino también elementos del sistema y del terreno.

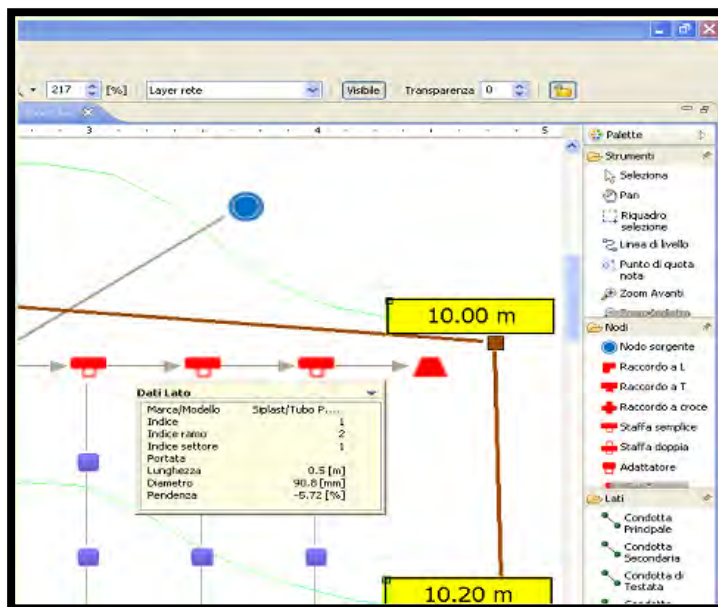


Figura 9. Utilización de la tecnología INDO para el trazo del sistema de riego.

IrriPro produce, como resultado del diseño mapas temáticos que pueden usarse para presentar resultados o tomar decisiones de cambios en el diseño.

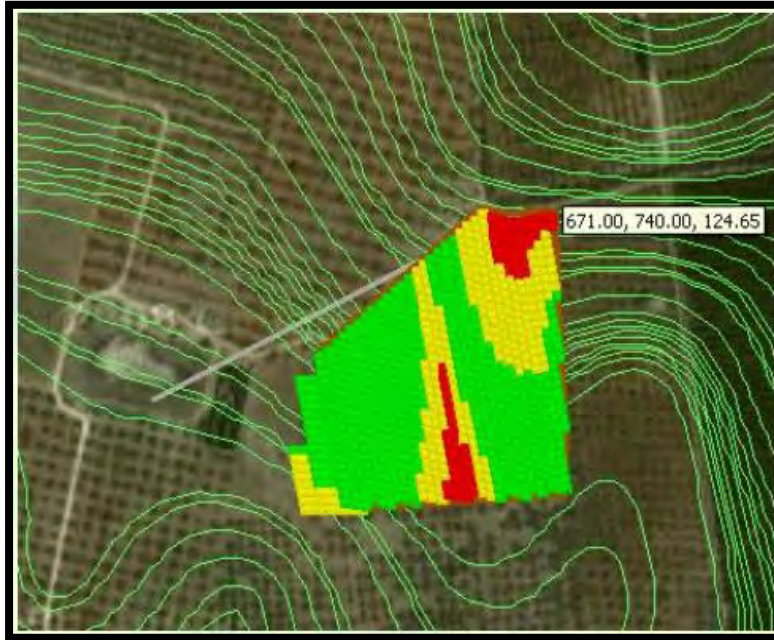


Figura 10. Mapa temático.

Para tener una mejor perspectiva IriPro también produce mapas en 3D.

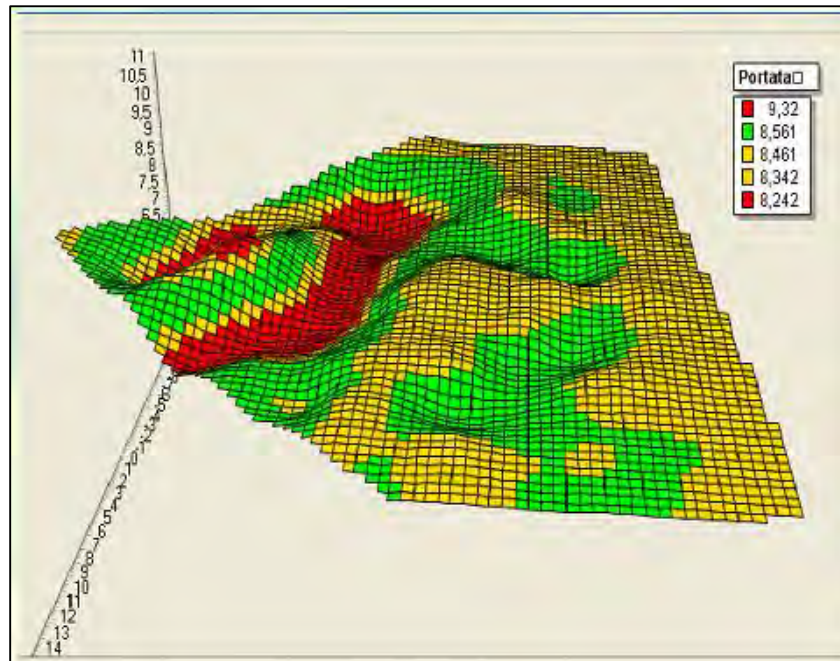


Figura 11. Mapa de contorno o 3D.

IriPro cuenta con una amplia base de datos de elementos de sistemas de riego (emisores, tubos, piezas especiales, etc.), son cerca de 9,000 elementos, cada elemento de la base de datos se encuentra con todos los parámetros para su cálculo y dibujo. Esta base además puede ampliarse para incorporar elementos de otros fabricantes no considerados.

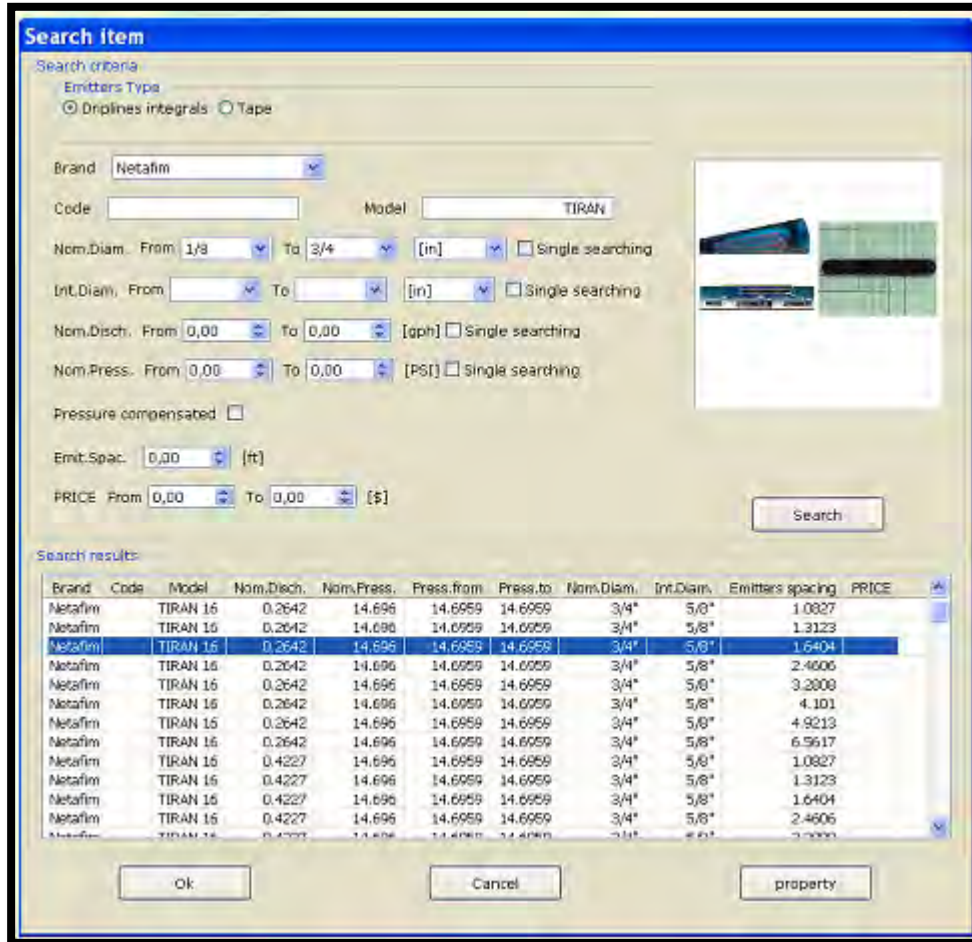


Figura 12. Base de datos de elementos de sistema de riego.

Como resultado del diseño, IriPro puede generar un Catálogo de Conceptos detallado con costo en formato PDF, XLS, RTF, HTML, etc.

DISTINTA MATERIALI
02/03/2022 17:42:49
powered by
irriworks

Condotte

N.	Marca	Modello	PN [mm]	DN/Di&nt. (I) [mm]	Long. [mm]	QR [L/h]	Intensitat. [m]
1	Generico	Generico		300.0	387.8		
2	Generico	Generico		65.0	19.02		
3	Generico	Generico		20.0	150.68		
4	Generico	Generico		12.0	4713.0		

Raccordi

N.	Marca	Modello	Tipo	D1	D2	D3	D4	Numero
1	Generico	Generico		300.0	300.0			3
2	Generico	Generico	Raccordo a T	300.0	300.0	65.0		3
3	Generico	Generico		300.0				1
4	Generico	Generico	Raccordo a T	65.0	20.0	20.0		1

Figura 13. Catálogo de Conceptos con costo.

IriPro no requiere de software de terceros, aunque puede importar y exportar a muchos formatos. IriPro está disponible en italiano, inglés, francés, español, portugués y catalán. Hay versiones para Windows XP, Vista, 7 and 8, Mac OS y Linux.

La versión Freeware viene solo en Ingles y el manual puede bajarse de forma gratuita, solo en italiano.

1.4 Materiales y Metodología

1.4.1 Materiales

- Programa de computo WCADI versión 12
- Programa de computo IRRICAD versión 13
- Programa de computo IrrigaCAD Versión 3.1.17
- Programa de computo IriPro Versión 3.5 Freeware
- Equipo de cómputo de escritorio marca DELL con las siguientes características:
 - ✓ Procesador Intel Core i7
 - ✓ RAM 12 GB
 - ✓ Sistema operativo Windows 8.1 de 64 bits

- Paquetería de Office
- Proyecto ejecutivo y de sistemas de riego parcelario del Programa manejo integral del suelo y agua 2002-2003 “El Muerto” (IMTA, incluye plano topográfico en dwg).
- AutoCAD Civil 3D 2013.
- Epanet 2.00.12

1.4.2 Metodología

1.4.2.1 Datos generales del proyecto.

El proyecto tipo se localiza geográficamente en el Ejido Mazatepec, municipio de Mazatepec Morelos, dentro de la cuenca hidrológica del Río Grande de Amacuzac, entre los paralelos 18° 20' y 19° 07' de latitud norte y entre 98° 38' y 99° 31' de longitud al oeste del meridiano de Greenwich. La altura es aproximadamente 1000 metros sobre el nivel del mar. Los datos meteorológicos se obtendrán de la estación meteorológica El rodeo, Morelos.

Clima

La temperatura media anual es de 23.5°C, la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales es poco variable. Las temperaturas más bajas se presentan en los meses de noviembre a febrero con la temperatura mínima mensual de 13.6°C en enero. Las temperaturas más altas se presentan de marzo a mayo con la temperatura máxima de 34.3° registrada en abril.

La humedad relativa promedio mensual es poco variable. Las mínimas anuales se presentan en los meses de noviembre y febrero con 49 % de humedad relativa, mientras que la humedad relativa máxima se presenta durante la época húmeda entre mayo y octubre. El valor más alto se registra en el mes de julio con 60 % de humedad relativa.

Para la variable del viento se estimó su valor promedio mensual para todo el año en 2m/s (una velocidad moderada, equivalente a los 173 km/día).

Debido a la baja nubosidad la cual también propicia incrementos notables en la temperatura, la insolación incrementa de un mínimo local de 6.1 horas luz en febrero y sube a la máxima insolación mensual registrada en el mes de abril con 7.3 horas luz. En verano es más alta la insolación incidente, pero la nubosidad y las precipitaciones durante la época húmeda de mayo a octubre atenúan la insolación significativamente, la radiación solar media en el año es de 6.1 horas/día.

En **Figura. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**3 se presentan los datos medios mensuales y anuales de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar necesarios para calcular el requerimiento de riego para la zona agrícola de Mazatepec, Morelos.

Tabla 3. Variables climatológicas para la estación el rodeo. (Fuente: IMTA 2002)

Mes	Temp Máx prom.	Temp Mín prom.	Temp Med	Hum Rel. prom.	Vel. Viento prom.	Rad. solar prom.
	°C	°C	°C	%	km/día	hr/día
Enero	28.2	13.6	20.9	52.0	173	6.5
Febrero	30.0	14.6	22.3	49.0	173	6.1
Marzo	32.9	17.1	25.0	51.0	173	6.3
Abril	34.3	19.1	26.7	53.0	173	7.3
Mayo	33.4	19.8	26.6	55.0	173	5.8
Junio	30.3	19.0	24.7	59.0	173	6.1
Julio	28.9	18.1	23.5	60.0	173	5.5
Agosto	28.9	18.0	23.5	59.0	173	5.0
Septiembre	28.2	17.8	23.0	56.0	173	5.2
Octubre	28.5	16.6	22.6	50.0	173	6.0
Noviembre	28.7	15.1	21.9	49.0	173	6.6
Diciembre	28.2	14.1	21.2	52.0	173	6.6

Fuente de abastecimiento

La fuente de abastecimiento es un pozo profundo construido en la parte inferior de la zona de riego, por lo que para llevarla al cultivo necesita vencer una carga estática de 29 metros hasta la parte más elevada de la zona a regar, la descarga la realiza una tubería de fierro fundido, con un diámetro de 8" (200 mm). En la **Figura. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4** se muestran las características de la bomba.

Tabla 4. Características de la bomba

Fuente	Gasto (l/s)	Superficie Beneficiada ha	Presión (kg/cm2)	HP	RPM
Pozo	50	55.56	7	100	1760

(Fuente: IMTA 2002)

Calidad del agua de riego

El análisis realizado por el IMTA indica que no se tienen restricciones para riego agrícola con los cultivos a establecer (**Figura. ¡Error! No se encuentra el origen de a referencia.5**), encontrando el agua en la clasificación C1S1. Se observó la presencia de un alto contenido de sólidos disueltos en el agua de riego y Bicarbonatos que producen un pH mayor que 7. Lo anterior no es restrictivo para goteo.

Tabla 5. Características del agua para riego

Muestra	Aniones me/l			Cationes me/l				CE mmho/cm	pH	RAS	PSI
	HCO3	Cl	SO4	Na	K	Ca	Mg				
1	4.19	0.12	0.904	0.31	0.33	3.31	2.4	0.599	7.33	0.18	0

(Fuente: IMTA 2002)

Caracterización del suelo con fines de riego

La textura del suelo en la zona de riego se clasifica como Franco- arcillo, con base en el muestreo y análisis físico del suelo realizado en varios lotes de los predios considerados (**Figura. 6**). Se detectó que éste tiene una estructura granular en la profundidad 0-20 cm, y una estructura laminar en la profundidad 20-35 cm. Existe un zona de tepetate o una capa impermeable como a los 40 cm de profundidad.

Tabla 6. Resultado del análisis de suelos para el ejido Mazatepec (Fuente: IMTA 2002)

Muestra	% Arena	% arcilla	% limo	Grupo Textural
0-20	37.32	30.68	32.00	Franco-Arcilla
20-35	45.32	32	32.68	Franco-Arcillo-arenoso

Con base en el análisis químico de los suelos (**Figura. 7**) el suelo se clasifica como sin problemas de salinidad y sodicidad, el cual prácticamente no tiene restricciones para los cultivos de maíz, frijol y hortalizas.

Parámetros físicos del suelo con fines de riego

En laboratorio de Riego y Drenaje del IMTA se realizaron pruebas de retención de humedad calculando el porcentaje de humedad a capacidad de campo, a una tensión de 0.3 atm. La capacidad de campo expresada en unidades volumétricas es de 0.33 cm³/cm³ para el suelo arcilloso. El punto de marchites permanente, calculado a partir de una tensión del suelo a 15 atm resultó de en unidades volumétricas 0.185 cm³/cm³ Por lo que la humedad aprovechable (HA) calculada es de 0.145 cm³/cm³. Esto quiere decir, que el suelo en 1 m de profundidad, son capaces de almacenar láminas de riego de 14.5 cm (**Figura. 8**).

Tabla 7. Análisis químico de los suelos (Fuente: IMTA 2002)

Muestra	pH	CE Mmho/cm	Aniones meg/l			Cationes meg/l				RAS	PSI
			HCO3	Cl	SO4	Na	K	Ca	Mg		
Lote 39 0-20	8.25	0.468	4.28	0.08	1.04	0.23	0.06	3.61	1.53	0.14	0.0
Lote 39 20-35	8.11	0.491	3.24	0.10	0.83	0.34	0.06	3.40	1.74	0.21	0.0

Tabla 8. Resumen de características físicas del suelo.

Característica	Valor
Característica física del suelo	Franco-arcilloso
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	0.33
Punto de marchitez permanente (cm ³ /cm ³)	0.185
Humedad aprovechable (cm ³ /cm ³)	0.145
Conductividad hidráulica a saturación (cm/hr)	0.005 a 0.10
Lámina de riego (cm) a la profundidad de raíz de 1 m.	14.5

(Fuente: IMTA 2002)

Cultivos

Los cultivos principales que se pretende sembrar con el sistema de riego son maíz,

Chile, nardo y hortalizas como jitomate y calabacita. El patrón de cultivos pretende que tenga una distancia entre surcos de 1 m y distancia entre plantas de 0.30 m.

Información topográfica

El relieve de la zona de riego a nivel parcelario es moderado, siendo para este grupo de parcelas la pendiente promedio del 4% en la dirección de la pendiente mayor y de un 0.3% en la dirección transversal.

La superficie total considerada en este proyecto es de 49.56 ha la cual corresponde a 39 usuarios con un superficie promedio de 1.27 ha.

1.4.2.2 Diseño agronómico.

El diseño agronómico fue tomado de IMTA (2002) como se muestra a continuación:

El requerimiento diario máximo de diseño fue de 4.9 mm que se redondeó a 5 mm y fue para el cultivo de jitomate (Tabla 9).

Tabla 9. Requerimiento de riego máximo

Cultivo	Requerimiento de riego máximo (mm/día)
Chile	1.05
Jitomate	4.9
Calabacita	4.2
Nardo	3.7

En el proyecto se utilizó tubería de PVC, en la red de conducción y distribución, la eficiencia de conducción considerada fue de 98 %.

Como el sistema proyectado fue riego por goteo se consideró una eficiencia de aplicación del 95%.

Considerando que los requerimientos de riego netos por cultivo son los calculados por fecha de siembra con el programa CROPWAT y que la eficiencia global del sistema fue de 93.3 % (95 % de aplicación y 98 % de conducción).

El volumen bruto diario del sistema fue de 1.5 litros, considerando un emisor de 1.26 litros por hora; el tiempo de riego se estimó en 1.20 horas

El requerimiento diario crítico se presentó para el jitomate, siendo de 4.9 mm/día, por lo que el intervalo de riego crítico considerando una lámina de riego neta de 7.0 cm, con un porcentaje de humedad aprovechable del 80 %, por ser un suelo delgado, fue de 14.28 días, pero considerando una lámina horario de 4.2 mm/h, el tiempo de riego diario fue 14. 4 horas.

El caudal por hectárea fue de 11.66 l/s utilizando goteros a cada 30 cm con un

gasto de 1.26 l/h. Se necesitaron 578.34 l/s para la superficie total a regar, como la fuente de abastecimiento tiene un gasto 50 l/s, se dividió el gasto requerido entre el disponible resultando 12 secciones con gasto de 48.18 l/s cada una, con un tiempo de riego de 1.17 horas. El resumen del diseño agronómico se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros obtenidos del diseño agronómico.

Parámetros	
Requerimiento de riego	5 mm/día
Superficie total	49.6 ha
Gasto del emisor	1.26 l/h
Separación de goteros	30 cm
Separación de laterales	1 m
Lamina aplicada	4.2 mm/h
Tiempo de riego	14.4 horas
Secciones de riego	12
Eficiencia global del sistema	93.3 %
Caudal disponible	50 l/s
Tiempo de riego por sección	1.17 horas

1.4.2.3 Diseño del sistema de riego mediante IRRICAD

Se siguieron los siguientes pasos para el diseño:

- Ingresar detalles de diseño
- Se eligió la base de datos integrada en el programa IRRICAD con formato Microsoft Access, que contiene información de tuberías, válvulas, emisores y accesorios que se utilizaron para el diseño
- Ingresar información de fondo
- Se ingresó la información a la plataforma de IRRICAD desde un archivo creado en AUTOCAD 2013 en formato DXF con los siguientes contenidos: curvas de nivel, bloques de riego y ubicación de la fuente de abastecimiento.
- Estructura del Sistema de riego
- Para cada bloque de riego se trazaron las líneas regantes con sus características de operación y se ubicaron las válvulas de control. El trazo de las zonas de riego se hizo de manera manual y automática. Se trazó la red principal y posteriormente se conectaron las válvulas a esta.
- Gestión y Diseño
- Se asignaron los límites permisibles de velocidad de flujo de agua en las tuberías. Se realizó el análisis y diseño hidráulico de la tubería secundaria. Posteriormente se verificó la presión en las válvulas de control y se seleccionaron las dimensiones de estas de acuerdo a criterios hidráulicos. De manera gráfica se asignaron los turnos de riego del sistema. Finalizadas las acciones anteriores se analizó el funcionamiento hidráulico de la tubería principal.
- Se revisaron los resultados hidráulicos del diseño, velocidad y presión, se verificaron que se encontraran dentro del rango permisible y requerido por el sistema.

- Imprimir planos e informes del diseño
- Se elaboró el plano que contiene el diseño del sistema de riego, se imprimieron los resultados y gráficos de operación y cuantificación de material.

(Para diseño detallado ir al Anexo A1).

1.4.2.4 Diseño del sistema de riego usando WCADI

El proceso de diseño mediante el programa WCADI, fue a partir del manual de usuario, y a la información del diseño tipo, se siguieron los siguientes pasos:

1. Iniciar el proyecto
Se creó un nuevo proyecto al cual se le asignaron los datos generales como: base de datos, parámetros de cálculo, unidades de trabajo, etc.
En base de datos se eligió el material con que se realizó el diseño, se agregó un bloque de material para diseño de red secundaria, de red principal y para la cinta de goteo.
2. Importar información de AUTOCAD
Se importó la información con formato "DXF" la cual se trabajó previamente en AutoCAD, la cual se compone de información topográfica (curvas de nivel), y los polígonos correspondientes a los bloques de riego.
3. Diseño de bloques de riego
Para los diseños de bloque de riego, primero se determinaron las características de la subárea, a la cual se ingresó información gráfica y numérica mediante tablas. Posteriormente se ingresó información para el complemento de los bloques de riego, ya ingresados desde AutoCAD y para el diseño de las laterales y secundarias se ingresó información como variación de presión, localización de válvula de control, etc.
4. Diseño de la tubería secundaria
El trazo de la tubería secundaria se realizó según los parámetros ingresados en los bloques de riego, los cuales determinaron su localización así como de la válvula de control. Cuando el trazo de la tubería resulto acorde a lo planeado, se procedió con el diseño automático de diámetros, en función de las ecuaciones y parámetros determinados en el apartado de bloques.
5. Diseño de la tubería principal
El diseño de la tubería secundaria tuvo lugar a una serie de pasos que permitieron el diseño óptimo para la red
 - Parámetros de diseño para red principal; se agregó información del número de turnos, perdidas de carga en filtración y válvulas de control, ecuación utilizada para perdidas de carga entre otros.
 - Ubicación de la fuente de abastecimiento y nodos del sistema.
 - Creación de los tramos de tubería
 - Selección de los turnos de riego, sin rebasar el gasto disponible.
 - Selección de archivos de materiales y límites de velocidad para el diseño de los tramos de la red.
 - Ingreso de información para el equipo de bombeo.

- Diseño de diámetros
6. Impresión de plano e importación de información a AutoCAD
Se configuro el programa para impresión y exportación de los planos a AutoCAD con los elementos deseados.

(Para diseño detallado ir al Anexo A2).

1.4.2.5 Diseño del sistema de riego usando IrrigaCAD

Se siguió la siguiente metodología:

1. Inicializar los programas
Se ejecutaron los programas IrrigaCAD y AutoCAD Civil 3D en modo administrador, para permitir la interacción entre estos.
2. Configuración de la topografía
La información topográfica procedente del diseño tipo se configuro para utilizarse mediante las herramientas de AutoCAD Civil 3D.
3. Configuración de IrrigaCAD
Se realizó la conexión de proyecto entre AutoCAD y las carpetas de trabajo de IrrigaCAD. Se crearon las capas en AutoCAD mediante las herramientas de IrrigaCAD. Se configuración los datos técnicos como: capa de topografía, ecuación de pérdida de carga, selección de materiales para el diseño.
4. Definición de bloques de riego
Se asignaron las parcelas del diseño tipo a la capa límite y se calculó su área y gasto en función del área y emisor seleccionado.
5. Calculo de laterales y secundarias
Se determinó la longitud máxima de los laterales de riego, se indicó la dirección de riego y de texto, se trazaron manualmente las laterales, se ubicaron las válvulas de control y se realizó el diseño de diámetros automático para la tubería secundaria.
6. Trazo de red principal
Se ingresaron nodos auxiliares, se trazó la red principal manualmente, se determinaron los turnos de riego y se realizó el diseño de diámetros.
7. Impresión e importación de plano
Se configuro la ventana de edición de planos de AutoCAD, se ajustó la escala adecuada y se guardó el archivo en formato PDF.

1.4.3 Criterios para la evaluación cualitativa del desempeño de los programas comerciales para el diseño

Los criterios para evaluar los programas de cómputo para diseñar sistemas de riego se definieron en base a la norma ISO/IEC 9126 emitida por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrónica Internacional (IEC), dicha norma define los estándares para evaluar software. De igual forma para determinar dichos criterios, se tomó en cuenta el desempeño de los programas WCADI, IRRICAD e IrrigaCAD; en la realización de un diseño tipo propio de las

características topográficas y de tenencia de la tierra en México.

Según la norma ISO/IEC 9126 la calidad del software se puede determinar por un conjunto de criterios los cuales son: funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, capacidad de mantenimiento y portabilidad. Cada uno de estos criterios se conforma por subcriterios, se tomaron los más apropiados y se adaptaron para la evaluación de los programas para diseño de riego presurizado seleccionados. Los criterios mencionados son parte de la evaluación interna y externa que se realizó de los programas, además se determinaron 4 criterios para evaluar los programas según la experiencia del usuario.

Criterios para evaluar los programas de cómputo para diseño de riego presurizado según su calidad interna y externa:

1.4.3.1 Funcionalidad

La funcionalidad es la extensión o cantidad de posibilidades provistas por un sistema (Scalone, 2006), es decir es la capacidad del programa de cómputo para proveer las funciones que satisfacen las necesidades explícitas e implícitas cuando el software se utiliza bajo condiciones específicas. Según la norma ISO/IEC 9126 para evaluar la funcionabilidad se tomaron en cuenta los siguientes subcriterios:

1.4.3.1.1 Adecuación

Es la capacidad del programa de cómputo de proporcionar las herramientas y funciones para realizar los procesos correspondientes a las necesidades del usuario.

Las funciones con las que deben cumplir los programas de diseño de sistema de riego son:

- Diseño de diversos tipos de sistema de riego presurizado (aspersión, goteo, sistemas presurizados por gravedad, etc.)
- Capacidad para ingresar información (datos, topografía, polígonos de áreas, imágenes de apoyo, etc.)
- Creación y modificación de áreas o zonas de riego
- Creación y diseño de red secundaria y línea regante.
- Creación y diseño de red principal
- Compilación de materiales resultado del diseño
- Creación de planos, tablas y gráficos con resultados producto del diseño hidráulico

1.4.3.1.2 Exactitud

Es capacidad del programa de cómputo para proveer los resultados o efectos acordados con un grado necesario de precisión.

Los diseños de riego presurizado generalmente se diseñan con el caudal nominal, pero este varía según la presión, temperatura, etc. por lo que es importante que el programa tome en cuenta un factor de eficiencia de uniformidad.

Los métodos integrados en el programa para realizar el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías laterales, secundarias y principales darán pauta a un diseño más preciso hidráulicamente.

1.4.3.1.3 Interoperabilidad

Es la propiedad del programa de interactuar con uno o más sistemas especificados. La interoperabilidad de los sistemas además de incluir la habilidad de intercambiar información, debe tener la capacidad de iteración y ejecución de tareas conjuntas (Zapata y González, 2009).

Para los programas de diseño de riego presurizado los subcriterios evaluados fueron: conexión con otros programas para realizar funciones de diseño.

1.4.3.1.4 Seguridad

Se definió la seguridad para los programas de cómputo como la capacidad para proteger la información y los datos, de modo que las personas ajenas al usuario no tengan posibilidad de ingresar a los mismos, la seguridad puede ser mediante hardware (Llaves físicas), o software (claves de acceso a los programas).

1.4.3.2 *Fiabilidad*

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE por sus siglas en inglés (1990) define la fiabilidad como la habilidad que tiene un sistema o componente de realizar sus funciones requeridas bajo condiciones específicas en periodos de tiempo determinados.

Según la Oficina Nacional de Gobierno Electrónico e Informática, ONGEI (2004), la funcionalidad es solamente una de las características de la calidad del software. Por lo tanto, la definición de la fiabilidad se ha ampliado a "mantener un nivel especificado del funcionamiento..." en vez de "...realizar una función requerida".

Durante el diseño del proyecto tipo, se evaluó la fiabilidad de los programas de acuerdo a los siguientes subcriterios:

1.4.3.2.1 Madurez

El programa debe ser capaz de evitar fallas originadas por una programación deficiente de su código.

1.4.3.2.2 Tolerancia a errores

Se presenta cuando el programa mantiene un nivel especificado de funcionamiento, en caso de errores o de incumplimiento de su interfaz especificada, ocasionados por deficiencias del programa o una inadecuada operación.

1.4.3.2.3 Recuperabilidad

La capacidad del programa para restablecer un nivel especificado de funcionamiento y recuperar los datos afectados directamente en el caso de un error. Cuando el proceso de guardar no se realiza constantemente y el programa colapsa, es necesario que éste tenga la capacidad de recuperar la información del proyecto en el cual se esté trabajando, además de evaluar cuando el programa esté disponible nuevamente para continuar operándolo.

1.4.4 Usabilidad

Bertoa y Vallecillo (2006), definieron la usabilidad como “la capacidad de un componente software para ser entendido, aprendido, usado y atractivo para los usuarios, cuando se usa bajo condiciones concretas”.

Los subcriterios con los que se evaluó la usabilidad de los programas fueron:

1.4.4.1.1 Entendimiento

Se define como entendimiento a la cualidad del programa para permitir al usuario definir si es adecuado para el trabajo que pretende realizar, y cómo puede ser utilizado para las tareas y las condiciones particulares de la aplicación. El entendimiento del programa estará condicionado a la documentación con la cual se oferte el programa, es decir a los manuales de usuario con los que cuente, y a la interfaz del mismo.

1.4.4.1.2 Aprendizaje

La capacidad del programa para permitir al usuario aprender su aplicación. Es decir el tiempo que le lleve al usuario realizar un diseño, utilizando por primera vez cada uno de los programas seleccionados.

1.4.4.1.3 Operabilidad

La capacidad del programa para permitir al usuario operarlo y controlarlo.

1.4.4.1.4 Atracción

Cualidad es graficas del programa, que permiten hacerlo más atractivo para el usuario.

1.4.5 Eficiencia

Es la posibilidad del programa de cómputo para proveer un desempeño adecuado, de acuerdo a la cantidad de recursos utilizados y bajo las condiciones planteadas (ONGEI, 2004). Los recursos pueden incluir otros programas, la configuración de hardware y software de la plataforma en la que se encuentre instalado el programa a evaluar.

Para los programas de diseño de riego presurizado se evaluó la eficiencia según el tiempo y los costos de cada diseño tipo realizados:

1.4.5.1 *Comportamiento de tiempos*

El programa debe proveer tiempos adecuados de respuesta y procesamiento en las etapas de diseño.

1.4.5.2 *Utilización de recursos*

La capacidad del programa para utilizar cantidades y tipos adecuados de recursos cuando este funciona bajo las condiciones establecidas. Un ejemplo de los recursos utilizados son: programas de cómputo, recursos humanos, bases de datos, topografía, imágenes de apoyo, etc.

1.4.5.3 *Eficiencia según tiempo, recursos y resultados obtenidos*

En base al diseño tipo realizado con los tres programas seleccionados y a los dos criterios anteriores, se determinó el programa con el cual se diseñó el proyecto

más económico.

1.4.5.4 Capacidad de mantenimiento

La facilidad de mantenimiento es la habilidad con la que se puede corregir un programa si se encuentra un error, se puede adaptar si su entorno cambia u optimizar si el cliente desea un cambio de requisitos. (González, 2001).

Se tomó en cuenta si los programas de diseño de riego, tienen disponibles actualizaciones con mejoras o correcciones de errores presentes.

1.4.5.4.1 Capacidad de ser analizado

La capacidad para atenerse a diagnósticos de deficiencias o causas de errores en el programa o la identificación de las partes a ser modificadas.

1.4.5.4.2 Cambiabilidad

Cualidad del programa para permitir que una determinada modificación sea implementada. Se entiende por cambiabilidad a las actualizaciones que presenten las empresas o personas desarrolladoras del software.

Se tomó en cuenta si están disponibles para el periodo en el cual opera la licencia, sin la necesidad de comprar una nueva versión.

1.4.5.4.3 Estabilidad

La capacidad del programa para evitar efectos inesperados debido a modificaciones del software.

1.4.5.5 Portabilidad

La capacidad del programa para ser trasladado de un entorno a otro. Pueden ser entornos organizacionales, de hardware o de software. (ONGEI, 2004).

1.4.5.5.1 Adaptabilidad

La capacidad del programa para ser adaptado a diferentes entornos especificados sin aplicar acciones o medios diferentes de los previstos para el propósito del programa considerado.

Con el presente criterio se evaluó si el programa de diseño puede operar desde diversos equipos de hardware, y si los resultados obtenidos pueden ser asociados a otros programas (CAD, editor de texto, hojas de cálculo, etc.) con el fin de

manipular la información obtenida.

1.4.5.5.2 Facilidad de instalación

Es un subcriterio, como su nombre lo dice, que evalúa la facilidad del proceso de instalación en un ambiente especificado.

1.4.5.5.3 Coexistencia

La capacidad del producto de software para coexistir con otros productos de software independientes dentro de un mismo entorno, compartiendo recursos comunes. Los programas pueden tener incompatibilidad con los sistemas de seguridad de los sistemas operativos donde se esté trabajando.

Criterios para evaluar los programas de cómputo para diseño de riego presurizado según la calidad en uso

1.4.5.6 *Calidad en uso*

La definición de la calidad en uso de acuerdo al ISO/IEC 9126 es "la capacidad de un producto de software de facilitar a usuarios específicos alcanzar metas específicas con efectividad, productividad, seguridad y satisfacción en un contexto de uso específico".

1.4.5.6.1 Efectividad

La capacidad del programa de cómputo para permitir lograr las metas fijadas por el usuario dentro de los estándares de calidad.

1.4.5.6.2 Productividad

Es la característica del programa de cómputo que permite a los usuarios emplear cantidades apropiadas de recursos, en relación a la eficacia lograda en un contexto especificado de uso. Los recursos relevantes pueden incluir: tiempo para completar la tarea, esfuerzo del usuario, materiales o costo financiero.

1.5 Resultados

Con el fin de evaluar el desempeño de los programas comerciales usados para el diseño de los sistemas de riego, se tomaron como base los criterios previamente establecidos. En este capítulo se hace una comparación entre dichos criterios y se hace una discusión respecto del que presenta las mejores utilerías para la

ejecución de un diseño de riego presurizado.

1.5.1 Funcionalidad

1.5.1.1 Adecuación

→ Capacidad de diseñar diversos tipos de sistemas:

De acuerdo a la Tabla 11 los cuatro programas de cómputo presentan cinco funciones en común, siendo IRRICAD el que domina este índice al presentar la función supresión de polvo, que consiste en controlar las partículas fugitivas del manejo de materiales a granel, diseño de sistema eléctrico y riego residencial como parte complementaria al diseño.

Tabla 11. Funciones de diseño de sistemas

Sistema/Función	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Aspersión	✓	✓	✓	✓
Micro-Aspersión	✓	✓	✓	✓
Goteo/Cinta de goteo	✓	✓	✓	✓
Análisis de redes de conducción de agua	✓	✓	✓	✓
Sistemas presurizados gravedad (Multicompuesta)	✓	✓	✓	✓
Evaluación de sistemas ya existentes	✓	✓	✓	✓
Césped Residencial y Comercial		✓		✓
Supresión de polvo		✓		
Sistema eléctrico		✓		
Calculo del requerimiento de agua en los cultivos	✓			

→ Capacidad de ingreso de información:

El ingreso de información fue dividido en tres categorías: materiales y accesorios, topografía y datos generales del proyecto.

En la Tabla 12 se indican la manera como se puede ingresar los materiales y accesorios necesarios para el diseño de riego. Y en la Tabla 13 muestra las variantes en las que se puede ingresar datos de topografía, ya sea desde archivos CAD en sus diferentes versiones, DEM, CSV, etc.

Los datos generales de los proyectos (nombre del proyecto, propietario, fecha, etc.) se ingresan manualmente en los tres programas.

Tabla 12. Ingreso de materiales y accesorios

Materiales y accesorios	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Base de datos	✓	✓	✓	✓
Periférico de entrada	✓	✓	✓	✓

Tabla 13. Ingreso de datos de elevación

Topografía	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Archivo de coordenadas X,Y,Z (CSV)	✓	✓	✓	
ESRI Maps (SHP)		✓	✓	✓
Archivos CAD (DXF, DWG, VCD, GCD)	✓	✓	✓	✓
DEM (Modelo Digital de Elevación)			✓	
Google Earth	✓			✓
Creación manual de elevaciones		✓		✓

→ Creación y modificación de áreas o zonas de riego

Los cuatro programas cuentan con herramientas para importar y crear polígonos referentes a las zonas o áreas de riego. Estos polígonos pueden ser importados desde archivos procedentes de un editor de planos (CAD) o desde coordenadas; además IRRICAD permite importar polígonos desde *shapes files*.

Para el caso de crear los polígonos manualmente los programas IRRICAD e IrrigaCAD presentan herramientas más útiles para esta tarea comparado con WCADI.

→ Creación y diseño de línea regante y red secundaria

La creación de los laterales de riego es similar en los tres programas, en todos se indica de manera gráfica la dirección.

En la Tabla 14 se muestra la comparativa de los procesos de diseño de líneas secundarias para cada programa de cómputo, la cual puede ser de manera manual o automática.

Tabla 14. Diseño de línea secundaria

Diseño de secundaria	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Ubicación manual	✓	✓	✓	✓
Ubicación automática	✓	✓		✓

IRRICAD a diferencia de los otros dos programas cuenta con una herramienta que indica al usuario el lugar ideal para colocar las válvulas.

→ Creación y diseño de red principal

El diseño de la red principal se dividió en tres secciones para su evaluación; trazo,

diseño de turnos y diseño de diámetros.

En la Tabla 15 se observa que el único programa capaz de realizar el trazo de la red principal de manera automática es WCADI, por medio de una herramienta que permite optimizar la red de acuerdo a parámetros hidráulicos e iteraciones.

En cuanto a la asignación de turnos y diseño de diámetros de la red principal, el programa IrrigaCAD presenta una desventaja en comparación con WCADI e IRRICAD, como se muestra en la Tabla 16 y 17.

Tabla 15. Trazo de red principal.

Trazo	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Manual	✓	✓	✓	✓
Automático	✓			

Tabla 16. Asignación de turnos.

Diseño de turnos	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Manual	✓	✓	✓	✓
Automático	✓	✓		

Tabla 17. Diseño de diámetros de red principal.

Diseño de diámetros	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Parámetros hidráulicos	✓	✓	✓	✓
Parámetros Hidráulico/Económicos	✓	✓		✓

→ Recopilación de materiales resultado del diseño

La recopilación de materiales la realizan los cuatro programas una vez que se tengan definidos en la base de dato. Los formatos de presentación varían para cada programa y se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Archivos de presentación de materiales.

Tipo de Archivo	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
MDB (Microsoft Access databases)	✓		✓	
Archivo de texto (TXT)	✓	✓		✓
RTF (Formato de texto enriquecido)		✓		✓
Imagen de mapa de bits		✓		✓
Formato XLS (Excel)	✓			✓

→ Creación de planos, tablas y gráficos con resultados producto del diseño hidráulico.

Los programas tienen la capacidad de imprimir los planos desde su plataforma, además cuentan con la capacidad de exportarlos a diferentes formatos como se muestra en la Tabla 19, siendo IRRICAD el que contiene una mayor cantidad de formatos disponibles para su exportación.

1.5.1.2 Exactitud

Para el cálculo de la eficiencia de uniformidad IRRICAD utiliza las ecuaciones de Christiansen, definición estadística y cuarto mínimo. WCADI utiliza la definición estadística, el cuarto mínimo y método de regresión lineal. Mientras que el programa IrrigaCAD no presenta ningún método para el cálculo de la eficiencia de uniformidad.

Para el diseño de la red principal, secundaria y laterales de riego el cálculo de las pérdidas de carga debido a la fricción, los programas IRRICAD y WCADI, utilizan Hazen–Williams y Darcy–Weisbach, según sea la elección del usuario. IrrigaCAD utiliza las fórmulas de Hazen–Williams y Manning.

Una desventaja de IrrigaCAD comparado con los otros programas es al momento de realizar el cálculo del gasto por bloques de riego, debido a que no toma en cuenta el diferencial de presión en las laterales.

Tabla 19. Formatos de exportación de planos.

Tipo de Archivo	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
DXF	✓	✓	✓	✓
HPGL file	✓			
DWG (AutoCAD)		✓	✓	✓
GCD (Generic CADD)		✓		
VCD (Visual CADD)		✓		
SHP (ESRI Maps)		✓		✓
VMF (Windows Metafile)		✓		
PDF		✓	✓	✓

1.5.1.3 Interoperabilidad

El programa IRRICAD, WCADI y IrriPro son autónomos en su proceso de diseño debido a que cuentan con una plataforma gráfica propia, mientras que IrrigaCAD se auxilia de la plataforma gráfica de los programas AUTOCAD Civil 3D y EPANET.

1.5.1.4 Seguridad

Para la utilización de los programas IRRICAD e IrrigaCAD cuentan con llave física.

Los programas no cuentan con herramientas que permitan al usuario la protección de los proyectos de trabajo. WCADI e IRRICAD manejan un formato de proyecto propio, lo cual impide leerlos o modificarlos en otro programa.

1.5.1.5 Fiabilidad

1.5.1.5.1 Madurez

El programa IrrigaCAD presentó mayor deficiencia y errores en el desarrollo del proyecto. Un problema es que no cuenta con un proceso de instalación fiable y seguro, además al depender de una plataforma grafica externa no tiene ningún control si ésta presenta fallos.

1.5.1.5.2 Tolerancia a errores

Los programas IRRICAD, WCADI e IriPro informan los posibles errores que comete el usuario durante el proceso de diseño, herramienta con la cual no cuenta IrrigaCAD.

1.5.1.5.3 Recuperabilidad

WCADI cuenta con una herramienta de autoguardado en tiempo real, que en caso de fallo no se pierde la información de trabajo. Si AutoCAD no presenta problemas o fallas, el programa IrrigaCAD puede colapsar sin afectar el proyecto en el que se está trabajando.

1.5.1.6 Usabilidad

1.5.1.6.1 Entendimiento

WCADI cuenta con manuales y tutoriales en formato de texto disponibles en idioma español e inglés. El entorno gráfico es amigable y el contenido de sus funciones sigue un orden lógico de los pasos para el diseño de sistemas de riego. IRRICAD cuenta con manuales y tutoriales en formato de video y texto disponibles en inglés. Entorno gráfico favorable para el entendimiento del usuario.

IriPro cuenta con manuales en disponibles en idioma español, italiano, portugués, francés, catalán e inglés. El entorno gráfico es amigable y el contenido de sus funciones sigue un orden lógico de los pasos para el diseño de sistemas de riego.

IrrigaCAD solo dispone de un tutorial en formato de video que ejemplifica el diseño de riego por goteo.

1.5.1.6.2 Aprendizaje

A reserva de que el usuario participe en un curso de capacitación para el uso de los programas de cómputo, WCADI permite mayor facilidad de aprendizaje

tomando en cuenta las características descritas en el subcriterio anterior.

1.5.1.6.3 Operabilidad

WCADI, IRRICAD e IrriPro permiten operar y controlar su interfaz sin restricciones, mientras que IrrigaCAD está condicionado a la respuesta de AutoCAD, ya que depende de su entorno gráfico.

1.5.1.6.4 Atracción

IRRICAD es el programa con interfaz gráfica más atractiva para el usuario.

1.5.1.7 Eficiencia

1.5.1.7.1 Comportamiento de tiempos

IRRICAD tiene mayor velocidad de respuesta en los procesos de diseño, comparado con IrrigaCAD y WCADI.

1.5.1.7.2 Utilización de recursos

En la Tabla 20 se muestran los requerimientos de software y hardware para el funcionamiento adecuado de los programas.

Tabla 20. Requerimiento de hardware y software.

Requerimientos	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Software adicional requerido			EPANET AutoCAD Civil 3D 2011 o 2013	
Sistema operativo	Windows XP o superior	Windows XP o superior IOS	Windows XP o superior	Windows XP o superior IOS Linux
Hardware	Intel Pentium Pro o superior o equivalente	Intel i5 superior o equivalente	AMD Opteron o Intel Pentium 4	Intel i5 superior o equivalente
Ram	4 GB	4 GB	4 GB recomendable 8 GB	4 GB

1.5.1.7.3 Eficiencia según tiempo, recursos y resultados obtenidos.

En la Tabla 21 se muestra la comparación de costo de cada uno de los programas y el tiempo que llevo realizar el diseño tipo con cada uno de ellos.

Tabla 21. Cantidad de mano de obra y costo de programas utilizados.

Concepto	WCADI	IRRICAD	IrrigaCAD	IrriPro
Costo de programa	1,500.00 USD	2,000.00- 5,000.00 USD	2,500.00 USD + 8,400.00 USD (AutoCAD Civil 3D)	79 Euros – 6250 Euros
Mano de obra	4 jornales	2 jornales	1 jornales	2 jornales

1.5.2 Capacidad de mantenimiento

1.5.2.1 Capacidad de ser analizado

Ninguno de los programas de cómputo contiene las herramientas para realizar esta característica. Los archivos fuentes son inaccesibles.

1.5.2.2 Cambiabilidad

Cuando se encuentra disponible una nueva versión, el único programa capaz de actualizar la versión existente es IRRICAD. IrrigaCAD, IrriPro y WCADI tienen que eliminar por completo los componentes del sistema para no generar conflictos. IRRICAD e IrriPro se encuentra en desarrollo constante generando actualizaciones para una misma versión, con el fin de corregir posibles errores.

1.5.2.3 Estabilidad

Debido a que WCADI e IrrigaCAD no presentan actualizaciones, este subcriterio no aplica para estos programas. Al actualizar IRRICAD no presenta eventos inesperados lo cual hace cumplir este criterio.

1.5.3 Portabilidad

1.5.3.1 Adaptabilidad

IRRICAD es el único programa que tiene la herramienta para operar desde red, utilizando solo una llave física.

1.5.3.2 Facilidad de instalación

WCADI e IrriPro comparado con IRRICAD e IrrigaCAD presentan mayor facilidad de instalación, al contar con una herramienta de ejecución automática, que es la encargada de todo el proceso; caso contrario a IrrigaCAD que parte de su instalación se hace manual, lo que da lugar a que se cometan errores y no tenga un funcionamiento correcto.

1.5.3.3 Coexistencia

El sistema operativo Windows puede generar errores al momento de instalar IRRICAD y WCADI, por lo que es necesario desactivar la protección de cuentas de usuario.

IRRICAD presenta conflictos al momento de generación de archivos de informes con el sistema de seguridad instalado (antivirus).

Los resultados obtenidos en base a los criterios descritos en la metodología para la evaluación en calidad de uso de los programas fueron:

1.5.3.4 Calidad en uso

1.5.3.4.1 Efectividad

El estándar de calidad para los sistemas de riego en México los define la norma NMX-0-177-SCFI-2002; los tres programas se pueden adecuar a los lineamientos de ésta.

1.5.3.4.2 Productividad

Como se mencionó en los resultados de la evaluación interna y externa, el programa que demostró menor tiempo de diseño y de aprendizaje fue IRRICAD.

1.5.3.4.3 Seguridad

Operar los programas no representa ningún riesgo para los usuarios, sin embargo el usuario debe estar capacitado en el proceso de diseño de sistemas de riego, para no generar proyectos deficientes que originen errores en su ejecución.

IRRICAD emite alertas al usuario cuando el diseño rebasa los parámetros permisibles.

1.6 Conclusiones

WCADI

WCADI presenta sus herramientas en secuencia al desarrollo del diseño de riego. El trazo de la red principal se puede realizar de manera automática por medio de parámetros hidráulicos e iteraciones. Estas ventajas sobre IRRICAD e IrrigaCAD permiten mayor entendimiento y facilidad de manejo al momento de realizar el diseño de un sistema.

IRRICAD

IRRICAD presenta dominio sobre WCADI e IrrigaCAD, cuenta con mayores funciones de diseño de sistemas. El programa genera advertencias cuando se exceden los rangos o valoraciones sobre las especificaciones de diseño. La base de datos puede incorporar cualquier marca o modelo de producto de riego. Además de que sus desarrolladores mantienen apoyo técnico permanente para los usuarios.

IrrigaCAD

IrrigaCAD tiene la ventaja de auxiliarse del programa AutoCAD Civil 3D al combinar herramientas para su funcionamiento y para la edición de planos. El programa puede ser utilizado en cualquier equipo que tenga los programas necesarios para su funcionamiento, mediante la llave física.

El programa no cuenta con herramientas que indiquen al usuario los errores que se presentan durante las etapas de diseño.

IrriPro

IrriPro es un desarrollo italiano de la Universidad de Palermos que se encuentra en desarrollo y se presenta como una opción interesante con cada vez más y mejores funciones. Al parecer apunta a ser un fuerte competidor de IRRIGACAD en un futuro cercano.

1.6.1 Conclusiones generales

IRRICAD, IrrigaCAD, WCADI e IrriPro cuentan con las herramientas necesarias para realizar el diseño de sistemas de riego.

Según la evaluación realizada de los criterios definidos, se concluyó que el programa IRRICAD es el que mejor se adecua a las condiciones locales de México.

Para diseñar sistemas de riego presurizados por medio de los programas evaluados, el usuario debe contar con los conocimientos básicos de ingeniería de riego, ya que el software es un buen auxiliar en el diseño de los sistemas de riego pero que no puede substituir el conocimiento y experiencia del diseñador.

**APLICACIÓN COMPUTACIONAL PARA CALENDARIZAR RIEGO
EN TIEMPO REAL VÍA INTERNET CON ACTUALIZACIÓN
AUTOMATIZADA DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

INTRODUCCIÓN

Con el diseño del sistema de riego se asume que el agua ha de ser depositada en la zona de raíces de manera medida en tiempo y volumen. Desde luego que esta asunción es la base para el diseño; luego viene la evaluación y con ello, la comprobación si efectivamente lo que se diseño sucede. Gran parte de esto depende de la operación en campo.

La idea surge con el fin de flexibilizar el servicio de riego. La operación del sistema de riego, viene a complementar el beneficio del sistema de riego, al mantener los caudales y presiones bajo los cuales fue diseñado y con ello asegurar la entrega puntual. El volumen de agua por entregar y la frecuencia con que hay que hacerlo depende principalmente de factores del suelo, del clima y de la planta, por lo que conocer estas características facilitan el manejo.

La variabilidad del clima, del suelo y de la planta, pueden ocasionar variaciones significativas en tiempo; es decir que la lamina de riego en época de calor, no necesariamente es la misma en invierno, y entonces surge la necesidad de adecuar tiempo y con ello volumen.

El desarrollo de esta aplicación resuelve el ajuste de la lamina de riego, al contar con una base de datos climática, de cultivos, parcelas, suelo, etc., puede ser actualizada periódicamente de manera remota y con ello facilitar el manejo del riego a nivel parcelario.

Al ser desarrollado en un sistema operativo remoto, permite llevarlo a la parcela y hacer el ajuste del riego directamente en la toma granja, o válvula si así fuera necesario. Es posible llevar el control de la programación de riego, en consecuencia la planeación de los usuarios cuando este fuera por tandeos.

El uso de sistemas móviles ha revolucionado las telecomunicaciones en una gran diversidad de sectores, el sector agrícola no esta exento de ese desarrollo. En el IMTA el diseño de sistemas de riego es una actividad cotidiana. Con el desarrollo de aplicaciones remotas a la agricultura implica facilitar el acceso a los nuevos usuarios para que adopten tecnologías de riego, que se traduzcan en el uso eficiente del recurso, la organización y administración del agua y la planeación del riego en tiempo real.

2.1 Definición de requerimientos

2.1.1 Análisis de requerimientos, alcances y limitaciones de la aplicación

El desarrollo de este código consiste en generar una aplicación con acceso desde internet y que cuenta con la capacidad de interactuar con dispositivos móviles en lograr recabar información de las siembras ubicadas en los módulos de riego, donde generalmente no se cuenta con una conexión a internet o una señal remota con datos móviles. Para la implementación de esta aplicación se ha dividido en módulos que complementan:

1. Aplicación web.
2. Aplicación para Android.

2.1.2 Plataforma Web

El objetivo de esta aplicación es lograr contar con una interfaz amigable para poder realizar la captura de información necesaria para realizar las tareas siguientes:

- Administración de catálogos.
- Administración de la información meteorológica.
- Administración de Técnicos.
- Administración de Parcelas
- Calculo de requerimientos de riego.
- Administración de catálogos

La aplicación debe poder permitir agregar, modificar y consultar la información relacionada a las entidades que intervienen en el cálculo de los requerimientos hídricos, las entidades a considerar son las siguientes:

- **Sistemas de riego:** encargada de poder definir sus características en las cuales se consideraran: nombre, eficiencia global (eg), eficiencia de aplicación (ea).
- **Suelos:** definirá las características de los suelos disponibles en las parcelas, considerando nombre, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), humedad aprovechable ($HA = CC - PMP$).
- **Zona de riego (Distritos y Módulos de riego):** contienen las características generales de las zonas de riego como son: nombre y superficie física.
- **Cultivos:** define las características de los cultivos, tales como son: nombre, temperatura mínima (t_{min}), temperatura máxima (t_{max}), valor máximo del coeficiente de cultivo (K_{max}), valor a dimensional normalizado x cuando se presenta el valor máximo del coeficiente de cultivo (XK_{max}), valor inicial de K_c cuando el área foliar del cultivo es mínima (K_{c0}), profundidad radical inicial (P_{r0}), profundidad radical máxima (P_{rmax}), Parámetros de ajuste (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4), Días grados ha cosecha ($DG_{cosecha}$).
- **Ciclos agrícolas:** Contiene la definición de los tres principales periodos agrícolas de siembras que existen en las zonas agrícolas: Primavera-Verano (PV), Otoño-Invierno (OI), y Perennes (PER).

2.1.2.1 Administración de la información meteorológica.

Es necesario contar dentro de la aplicación con información meteorológica, la cual debe estar organizada por:

- **Estaciones:** debe poder consultarse el nombre, latitud, longitud, altitud.
- **Climatología:** contiene los datos climatológicos ordenas por estación meteorológica, las variables a considerar son: año, día juliano, Evapotranspiración (E_t), precipitación (Pe) y temperatura media (T_{med}).

2.1.2.2 Administración de Técnicos.

Es necesario generar una interfaz que apoye a capturar la información de los técnicos que utilizaran la aplicación con la finalidad de poder proporcionarles acceso a esta, los datos que se consideran son: nombre completo, correo electrónico de contacto, teléfono móvil, usuario y contraseña de acceso.

2.1.2.3 Administración de Parcelas.

Es necesario generar una interfaz que apoye a capturar la información de las Parcelas, con la finalidad de poder contar con los datos relevantes como son: cuenta, subcuenta, Distrito de riego, Modulo de riego, zona, sección, tenencia, nombre del propietario, superficie física y, posición geográfica, siembras activas y seguimiento de riegos.

2.1.2.4 Aplicación para dispositivos móviles Android.

El objetivo de esta aplicación es contar con una interfaz para lograr realizar la captura de información en las parcelas y lograr llevar el seguimiento de los riegos y con ello tener un control de los riegos aplicados en función al seguimiento de las necesidades hídricas que se presentan en la siembra.

2.1.2.5 Herramientas de desarrollo

Para el desarrollo de esta aplicación se han seleccionado una gama de herramientas bajo tecnología java, las cuales se han utilizado en proyectos empresariales de alto impacto. Las herramientas seleccionadas son:

2.1.2.5.1 Vaadin

Vaadin es un Framework de aplicaciones web para aplicaciones dinámicas de Internet. En contraste con librerías Javascript y soluciones basadas en navegador Plugin, Vaadin ofrece una pila completa que incluye un modelo robusto programación del lado del servidor, así como herramientas de desarrollo en el cliente basado en GWT y HTML5. El modelo de desarrollo rápido que abstrae de los detalles de implementación, tales como RPC, la compatibilidad entre navegadores y control total sobre todas las capas.

Vaadin es una gran colección de componentes de interfaz de usuario. Para desarrollar la interfaz de usuario cuenta con componentes tales como botones, tablas, árboles y distribución de componentes. Los componentes utilizan detectores de eventos y el enlace de datos para comunicarse entre sí y con su lógica de negocio.

Vaadin es una arquitectura robusta para el desarrollo rápido de aplicaciones. La arquitectura basada en componentes junto con tipos estáticos del lenguaje Java y las características del enlace de datos ayudan a crear aplicaciones que sean fáciles de mantener y crear. El entorno de desarrollo y el soporte que incluye herramienta de diseño visual le ayudan a construir la interfaz de usuario web extremadamente rápido.

2.1.2.5.2 EclipseLink

EclipseLink es el proyecto de código abierto para el servicio de persistencia desarrollado por la Fundación Eclipse. El software proporciona un marco extensible que permite a los desarrolladores de Java para interactuar con diversos servicios de datos, incluyendo bases de datos , servicios web y mapeo XML Object (OXM).

EclipseLink se basa en el producto de la cual Oracle TopLink contribuyó el código fuente para crear el proyecto EclipseLink. La contribución original de la base de código de 11g de TopLink, y todo el conjunto de código base y características han sido aportadas.

2.1.2.5.3 MySQL

MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacional, multihilo y multiusuario con más de seis millones de instalaciones. Oracle Corporation desde abril de 2009 desarrolla MySQL como software libre en un esquema de licenciamiento dual. Por un lado se ofrece bajo la GNU GPL para cualquier uso compatible con esta licencia, pero para aquellas empresas que quieran incorporarlo en productos privativos deben comprar a la empresa una licencia específica que les permita este uso. MySQL es usado por muchos sitios web grandes y populares, como Wikipedia, Google, Facebook, Twitter, Flickr, y YouTube.

2.2 Desarrollo de la aplicación.

En la actualidad se cuenta con herramientas de programación que son bastante útiles en el desarrollo de nuevas aplicaciones informáticas que apoyan la toma de decisiones. En el presente proyecto, se decidió utilizar herramientas que son implementadas bajo la filosofía de software libre, la cual aporta excelentes opciones para desarrollar aplicaciones capaces de ser escalable, sobre todo, deja la puerta abierta a la comunidad de software libre para continuar fortaleciendo este desarrollo de software.

Para la implementación de una aplicación informática en esta área específica, es necesario contemplar y definir claramente cuáles son las herramientas que se utilizarán en el desarrollo, ya que una mala elección de herramientas podría

afectar de manera importante el proceso del proyecto de software. La presente investigación, hace uso de tres componentes importantes:

- a) Un lenguaje de programación, el cual debe ser robusto, versátil y eficiente en el manejo de memoria.
- b) Un motor de base de datos, capaz de manejar un gran volumen de información y proporcione versatilidad al momento de realizar las consultas.
- c) Un Framework o un conjunto de ellos, que nos faciliten realizar la conectividad entre los datos y el usuario final.

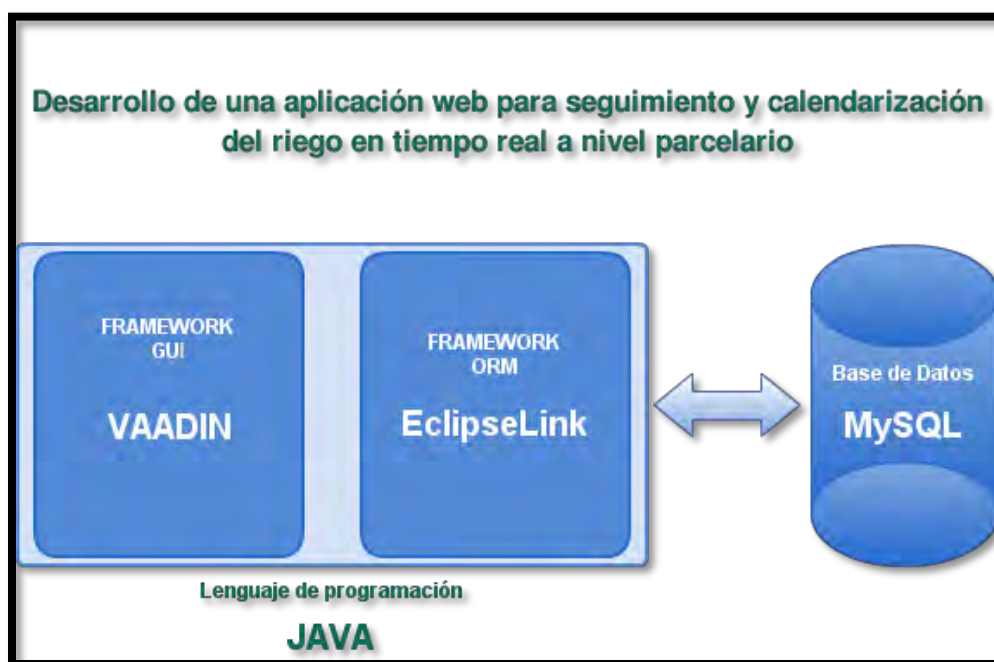


Figura 14. Herramientas de desarrollo.

La Figura 14 muestra las herramientas que fueron seleccionadas para la realización del proyecto, donde podemos observar los tres componentes antes mencionados (Lenguaje de programación, Motor de base de datos y el Framework).

En la problemática planteada existe una gran cantidad de información que necesita ser almacenada para posteriormente ser procesada y con ello lograr obtener el cálculo de los requerimientos hídricos. Hay que recordar que la persistencia es el arte de poder almacenar y recuperar la información desde una fuente de datos sin importar el tipo, la fuente puede ser un archivo o un motor de base de datos, donde el responsable de realizar la persistencia es el encargado de recuperar la información contenida.

La necesidad de persistencia de la información se muestra en la Tabla 22. Estas son las entidades que intervienen en el problema y las relaciones que se tienen entre cada una de ellas, estas últimas se pueden ver en la Figura 15. También se

puede observar el modelo Entidad – Relación de la base de datos, este diagrama da a conocer la forma en que se interrelacionan las entidades.

Tabla 22. Entidades del proyecto.

ENTIDAD	DESCRIPCIÓN
Estaciones Meteorológicas	Entidad encargada de poder designar la fuente de la climatología a emplear en los cálculos de requerimientos.
Cultivos	La cual define los parámetros de calendarización de riego, coeficiente de cultivo, profundidad radical y el factor de abatimiento, de cada cultivo en función de los días grado calor.
Ciclo	Contiene la definición de los tres principales periodos agrícolas de siembras que existen en las zonas agrícolas: Primavera-Verano (PV), Otoño-Invierno (OI), y Perennes (PER).
Las Zonas agrícolas	Almacenan la información general de la zona de riego como nombre y superficie cultivable.
Suelos	Se encarga de almacenar los tipos de suelo y los datos relacionados a él como son el nombre, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad aprovechable.
Sistemas de riego	Donde se contiene la información relacionada a los diferentes sistemas de riego y que almacena eficiencia global



Figura 15. Diagrama ER de la base de datos.

2.2.1 Estaciones Meteorológicas

El sistema cuenta con estructura de datos para poder almacenar la información de estaciones meteorológicas, el desarrollo de estas entidades tienen la capacidad de poder almacenar varios años de información climática con la finalidad de poder proporcionar un amplio conjunto de datos de clima.



Figura 16. Diagrama Entidad - Relación para estaciones climatológicas.

El diseño de esta relación soluciona la necesidad de poder contar con una climatología para cada una de las parcelas, de tal manera que cada una de estas tenga una referencia climática para poder realizar el cálculo de requerimientos hídricos de cada una de las siembras.

2.2.2 Distritos y Módulos de riego

Un requerimiento del sistema consiste en poder lograr poder administrar las

parcelas a nivel de módulo de riego, logrando tener el desglose de parcelas a diferentes niveles de integración. La Figura 17 muestra el diagrama entidad relación que describe la solución planteada para este requisito.

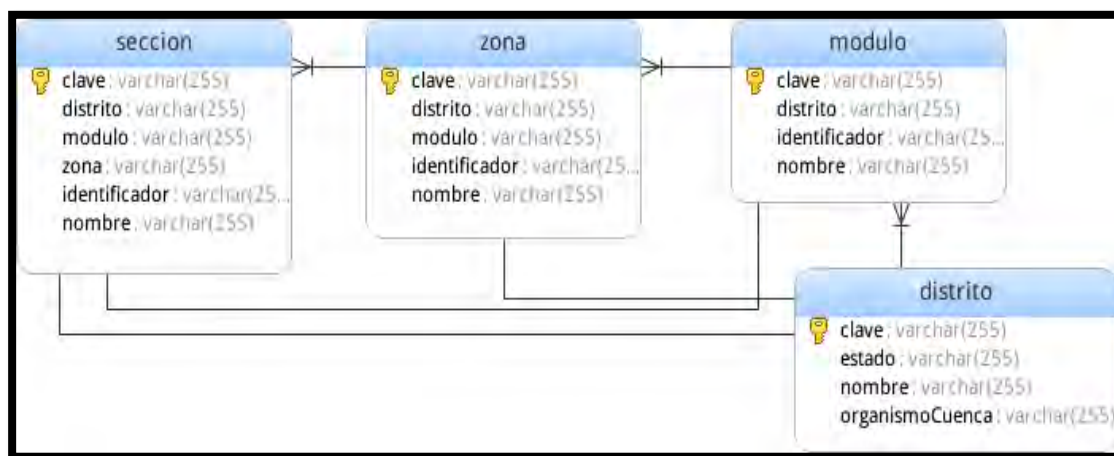


Figura 17. Diagrama Entidad - Relación para Zonas agrícolas.

2.2.3 Usuarios

El acceso a la aplicación web debe ser limitado a solamente personal autorizados, para ello se debe tener un control a nivel de módulo de riego, y contar con diferentes tipos de usuario, se han implementado tres niveles de privilegios descritos en la Tabla 23.

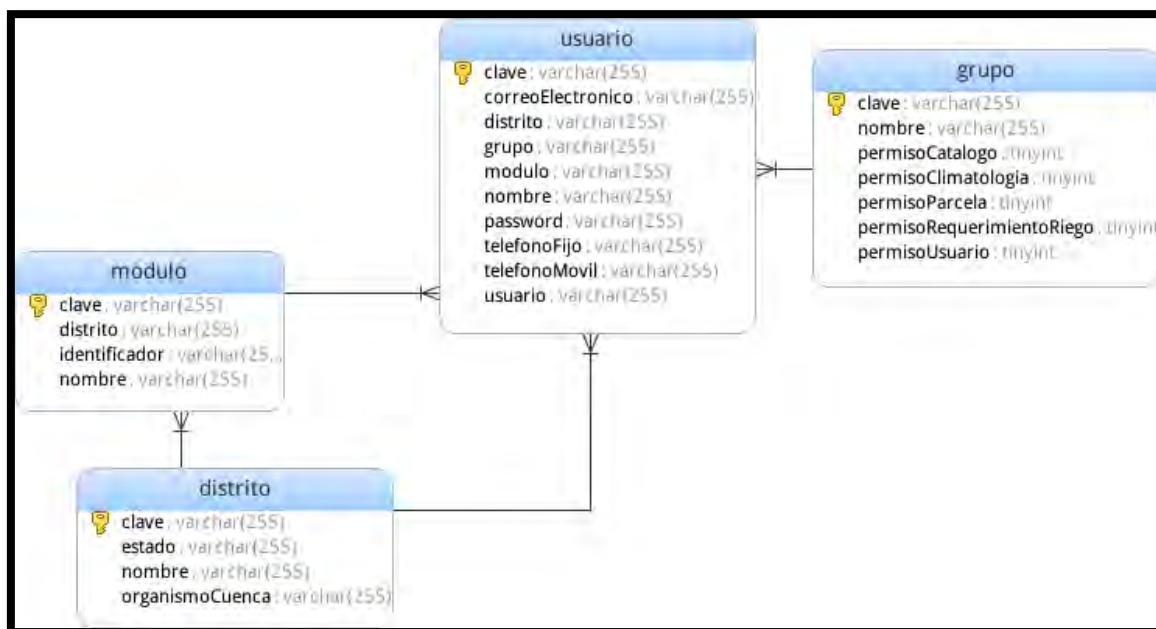


Figura 18. Diagrama Entidad - Relación para usuarios del sistema.

Tabla 23. Privilegios para los diferentes usuarios de la aplicación.

Tipo de usuario	Privilegios
Administrador	Tiene todos los privilegios con acceso a todo el contenido de la aplicación.
Técnico	Como responsable del riego, puede administrar las parcelas.
Capturista	Cuenta con privilegios para poder capturar los datos correspondientes a los parámetros para realizar el cálculo de los requerimientos hídricos.

La finalidad de contar con tipos de usuario es para poder tener el control de las actividades que puede realizar cada uno de ellos, de tal manera que pueda dividirse el trabajo de manera controlada.

2.2.4 Parcelas

La definición de la estructura de datos que almacena las parcelas se diseñó tomando en cuenta las siguientes características:

- Las parcelas pertenecen a un estado y municipio.
- Se tiene asignado algún tipo de tenencia de la tierra.
- Se tiene la ubicación de la parcela a diferentes niveles, dentro de los cuales tenemos: sección, zona, modulo y distrito.
- Cada una de las parcelas tiene asignado un técnico, el cual es el responsable de llevar el seguimiento agrícola de la siembra.
- Cada una de las parcelas posee un dueño, del cual se tienen sus datos personales básicos como son: nombre, teléfono, domicilio y correo electrónico.
- Cada parcela debe tener una estación meteorológica asignada para poder contar con información de clima y con ello poder contar con información para realizar el cálculo de los requerimientos hídricos.

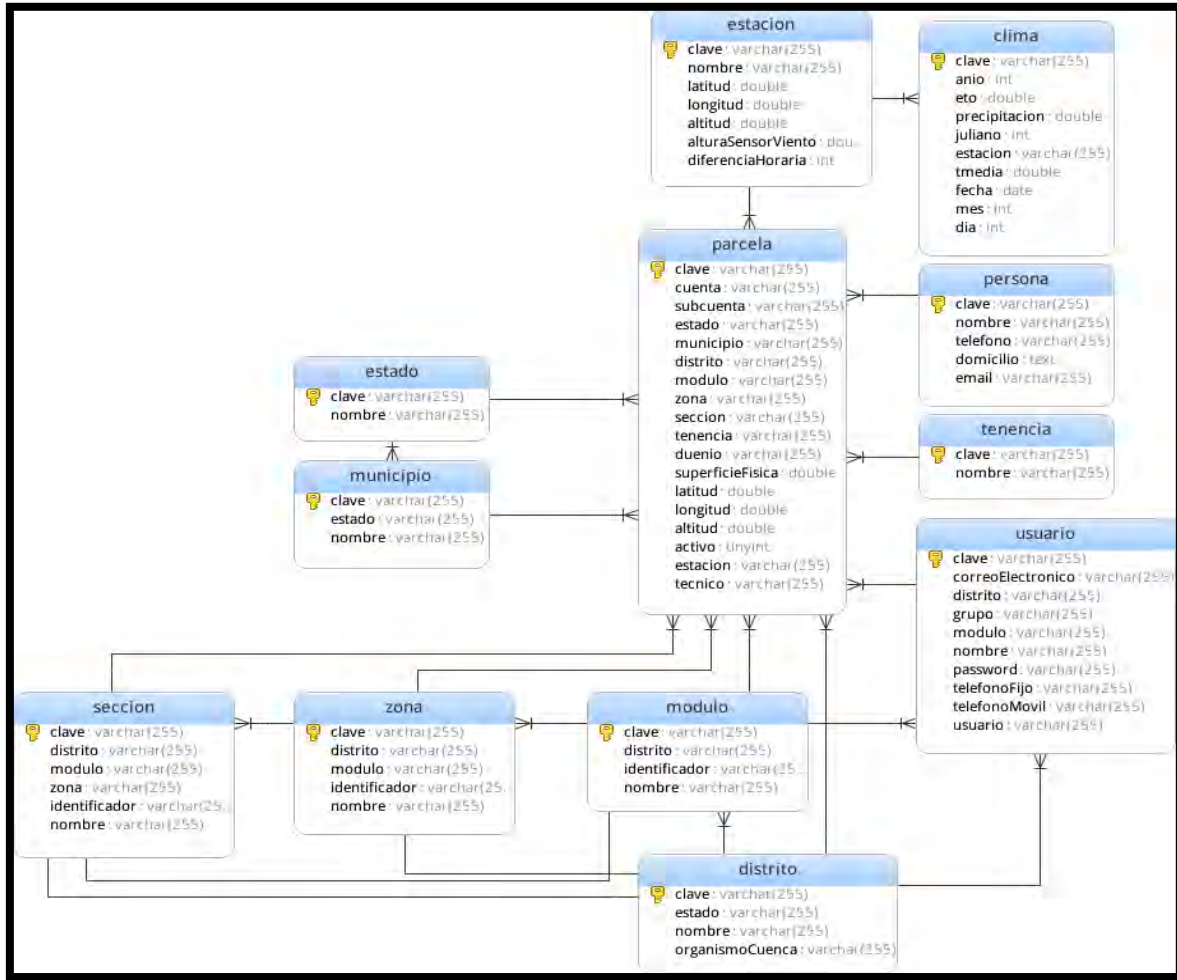


Figura 19. Diagrama Entidad - Relación para parcelas.

2.2.5 Siembras

El desarrollo de las estructuras de datos de las siembras implicó tener en cuentas las siguientes características:

- Una parcela puede contener una o varias siembra, en donde, la suma de las superficies establecida de cada una de estas no supere la superficie física de la parcela.

$$Superficie_{física} \geq \sum_{i=1}^n Superficie_{establecida}$$

- Cada una de las siembras tendrá definido un sistema de riego, suelo, ciclo agrícola, cultivo.
- Se deberá llevar el seguimiento de riegos

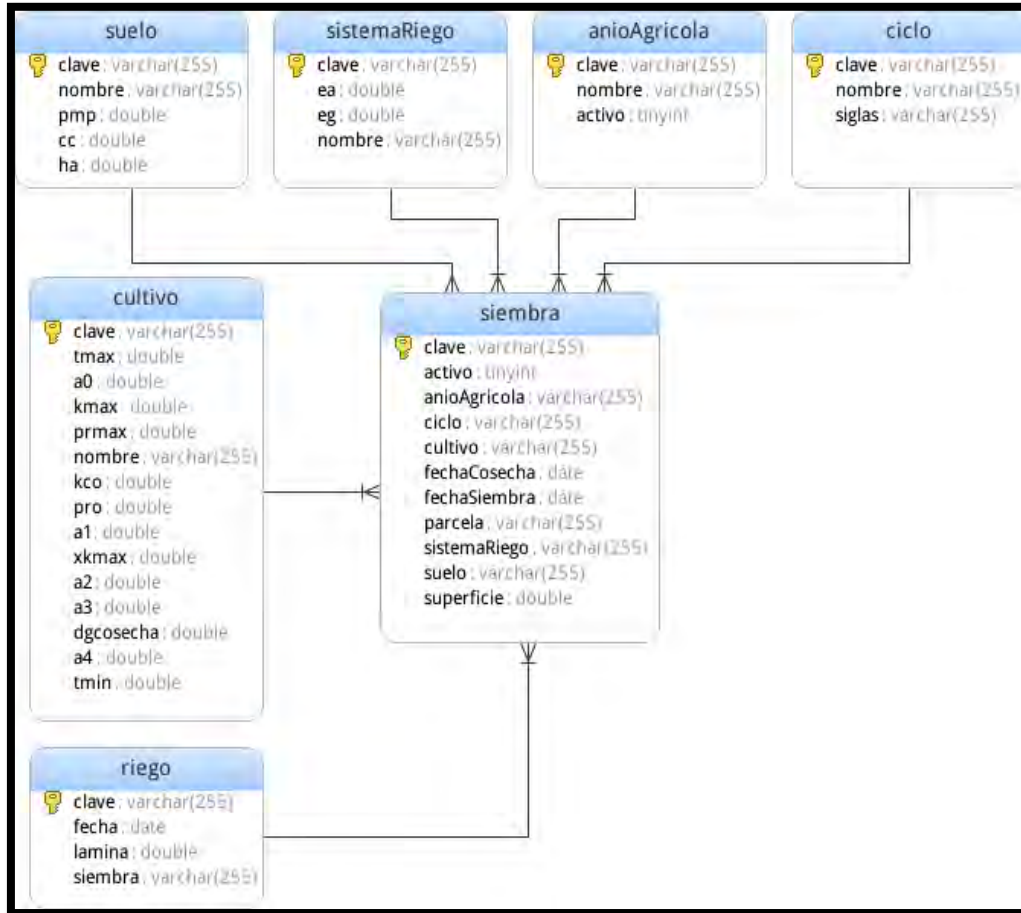


Figura 20. Diagrama Entidad - Relación para siembras.

2.3 Pruebas y validación.

2.3.1 Administración de la información del padrón de parcelas.

Los distritos de riego se encuentran divididos en Módulos de riego, en los cuales la unidad mínima que lo componen son las parcelas, que es en donde se realizan cada una de las siembras, una siembra es un cultivo que se desarrolla en cada uno de los ciclos agrícolas que puede ser Otoño-Invierno, Primavera verano, Segundos cultivos o Perennes.

Dentro de la aplicación se tiene una sección dedicada a la administración de la información de las parcelas, ubicada dentro del menú principal denominada "Parcela", dentro de la cual se pueden realizar las siguientes operaciones:

- Buscar datos de parcela por número de cuenta.
- Agregar los datos de una nueva parcela.
- Editar los datos de una parcela.

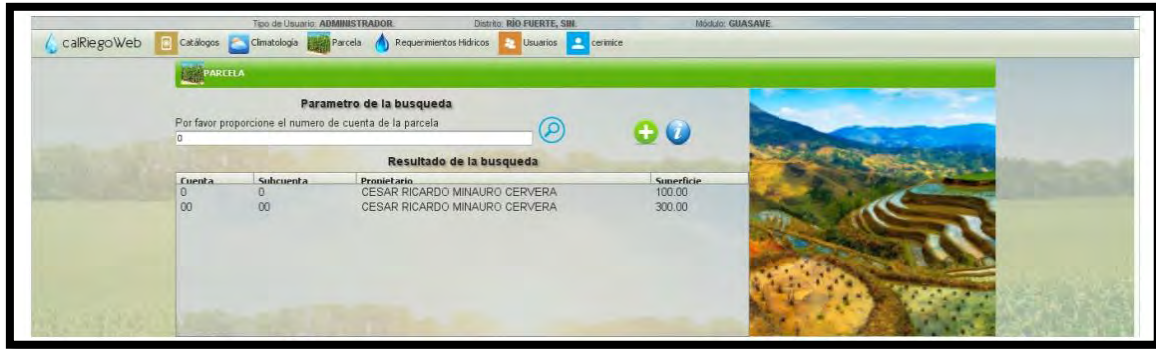


Figura 21. Ventana principal para la administración de parcelas.

Una de las finalidades principales de la aplicación es poder contar con un control de las parcelas que se administran, dentro de la ventana de parcelas es posible agregar nuevos datos por medio del botón destinado a la función agregar.

La ventana de agregar parcela se encuentra dividida en 4 secciones:

- Datos generales (la Figura 22) muestra los datos correspondientes a la parte administrativa de la parcela como son: Cuenta, Subcuenta, Distrito, Modulo, Zona, Sección, Estado, Municipio y tenencia.
- Datos geográficos (la Figura 23), se encarga de almacenar los datos siguientes Superficie física, latitud, longitud, altitud y estación meteorológica para datos del clima.
- Datos del dueño (la Figura 24), diseñada para almacenar el nombre, teléfono y correo electrónico del dueño de la parcela, con la finalidad de tener datos para poder tener un contacto rápido con el dueño de la parcela.
- Datos del técnico (la Figura 25), cada una de las parcelas debe estar asignada a un técnico, del cual se almacena información de contacto.



Figura 22. Ventana de datos generales de las parcelas.

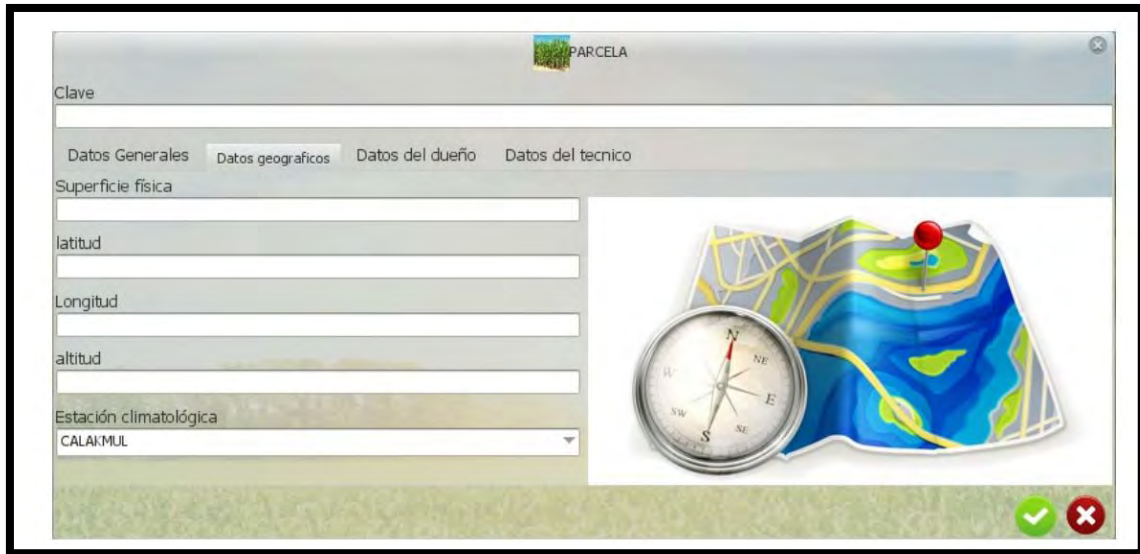


Figura 23. Ventana de datos geográficos de las parcelas.

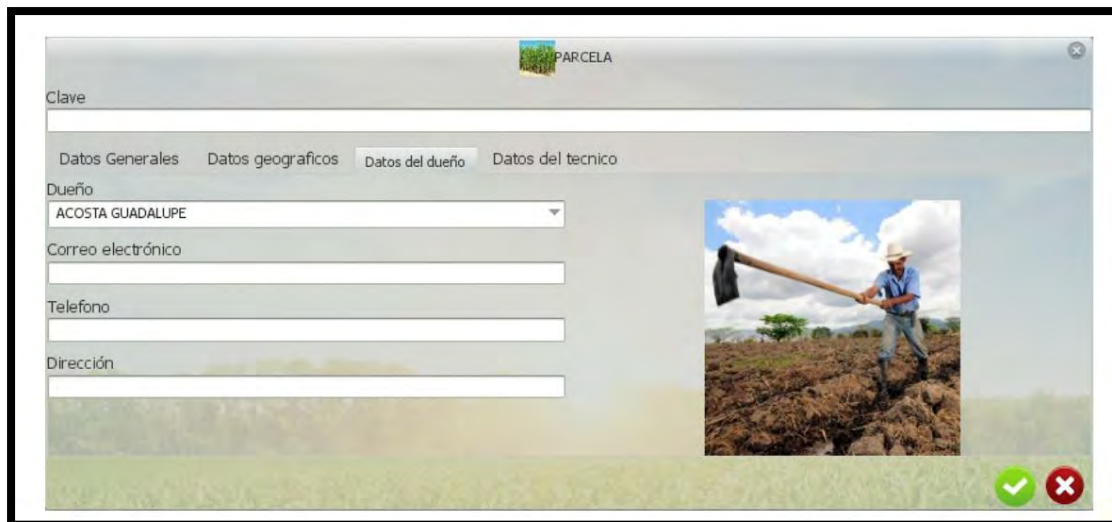


Figura 24. Ventana de datos del dueño de las parcelas.



Figura 25. Ventana de datos del técnico de las parcelas.

2.3.2 Acceso a la aplicación por medio de usuario y contraseña.

La aplicación cuenta con un acceso por medio de usuario y contraseña, el cual solo permite el acceso a usuarios previamente autorizados, esto es importantes ya que la aplicación se encuentra disponible en internet. La Figura 26 muestra la venta de acceso a la aplicación.



Figura 26. Ventana de acceso a la aplicación.

2.3.3 2.3.3. Seguimiento de las siembras y riegos.

2.3.3.1 2.3.3.1. Seguimiento de siembras

El seguimiento de las siembras se desarrolló como un administrador de siembras, el cual se encarga de poder contar las operaciones sobre estas, las operaciones que se pueden realizar sobre las siembras son las siguientes:

- Buscar las siembras por año agrícola.
- Agregar datos de nuevas siembras.
- Modificar los datos de siembras existentes.

La Figura 18 muestra el dialogo principal del seguimiento de las siembras, este dialogo nos proporciona información importante de las parcela como son:

- Superficie total (Superficie Física).
- Superficie establecida.
- Listado de siembras por año agrícola

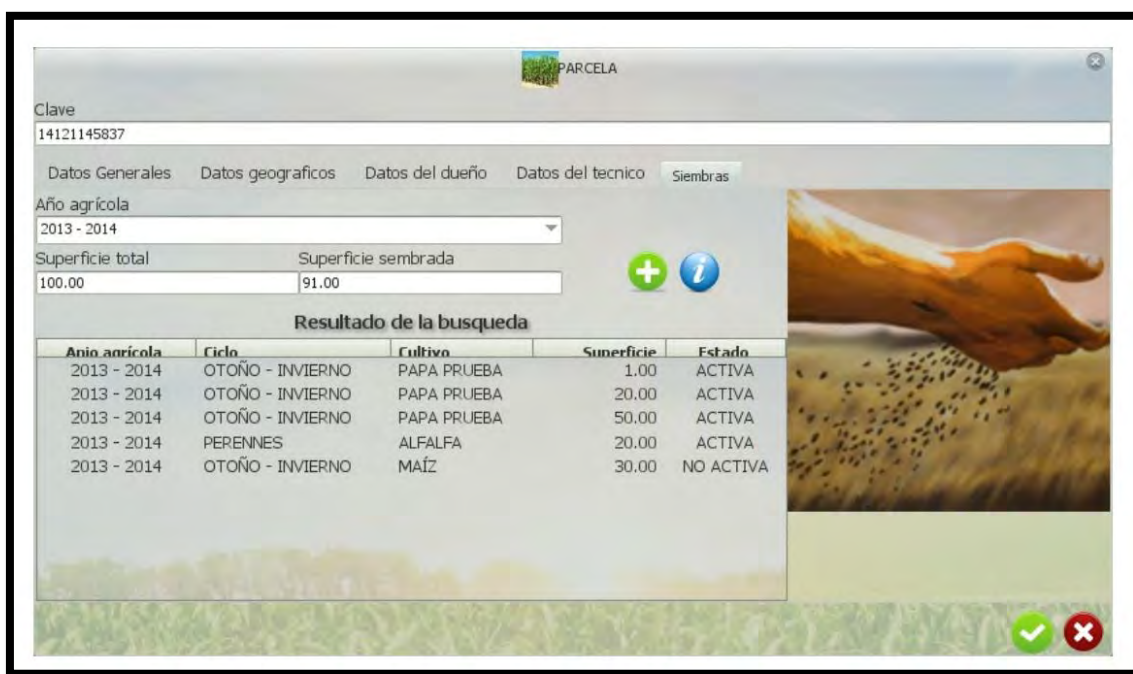


Figura 27. Ventana para el seguimiento de siembras.

2.4 Documentación

2.4.1 Manual de usuario aplicación Web

2.4.1.1 Administración de catálogos.

La aplicación permite agregar, modificar y consultar la información relacionada a las entidades que intervienen en el cálculo de los requerimientos hídricos, las entidades a considerar son las siguientes:

- Sistemas de riego: encargada de poder definir sus características en las cuales se consideraran: nombre, eficiencia global (eg), eficiencia de aplicación (ea).
- Suelos: definirá las características de los suelos disponibles en las parcelas, considerando nombre, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), humedad aprovechable ($HA = CC - PMP$).
- Zona de riego (Distritos y Módulos de riego): contienen las características generales de las zonas de riego como son: nombre y superficie física, Los distritos de riego están conformados por módulos de riegos y estos se basan en las parcelas.
- Cultivos: define las características de los cultivos, tales como son: nombre, temperatura mínima (t_{min}), temperatura máxima (t_{max}), valor máximo del coeficiente de cultivo (K_{max}), valor a dimensional normalizado x cuando se presenta el valor máximo del coeficiente de cultivo (XK_{max}), valor inicial de K_c cuando el área foliar del cultivo es mínima (K_{c0}), profundidad radical inicial (P_{r0}), profundidad radical máxima (P_{rmax}), Parámetros de ajuste (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4), Días grados ha cosecha ($DG_{cosecha}$).
- Ciclos agrícolas: Contiene la definición de los tres principales periodos agrícolas de siembras que existen en las zonas agrícolas: Primavera-Verano (PV), Otoño-Invierno (OI), y Perennes (PER).

2.4.1.2 Administración de la información meteorológica.

La aplicación cuenta con el seguimiento de la información meteorológica, el cual se encuentra organizado de la siguiente manera:

- **Estaciones:** debe poder consultarse el nombre, latitud, longitud, altitud.
- **Climatología:** contiene los datos climatológicos ordenados por estación meteorológica, las variables a considerar son: año, día juliano, Evapotranspiración (Et_0), precipitación (Pe) y temperatura media (T_{med}).

2.4.1.3 Administración de Técnicos.

Se cuenta con una interfaz que apoya a capturar la información de los técnicos que utilizan la aplicación con la finalidad de poder proporcionarles acceso, los datos que se consideran son: nombre completo, correo electrónico de contacto,

teléfono móvil, usuario y contraseña de acceso.

2.4.1.4 Administración de Parcelas.

Se ha generado una interfaz que apoya a capturar la información de las Parcelas, con la finalidad de poder contar con los datos relevantes como son: cuenta, subcuenta, Distrito de riego, Modulo de riego, zona, sección, tenencia, nombre del propietario, superficie física y, posición geográfica, siembras activas y seguimiento de riegos.

2.4.2 Manual de usuario aplicación móvil

2.4.2.1 Descripción de la aplicación móvil.

La aplicación calRiegoMovil, fue desarrollada con el objetivo de permitir al usuario, la portabilidad de la información referente a su sección de trabajo, es una versión compacta de la aplicación calRiegoWeb, ya que contiene información relacionada con los catálogos, parcelas, climatología, siembras y riegos, misma información que se encuentra en la aplicación web. La diferencia con la versión web, radica en que solo se podrá visualizar la información referente a las parcelas asignadas a un técnico. La Figura 28 muestra el mapa de la aplicación móvil.

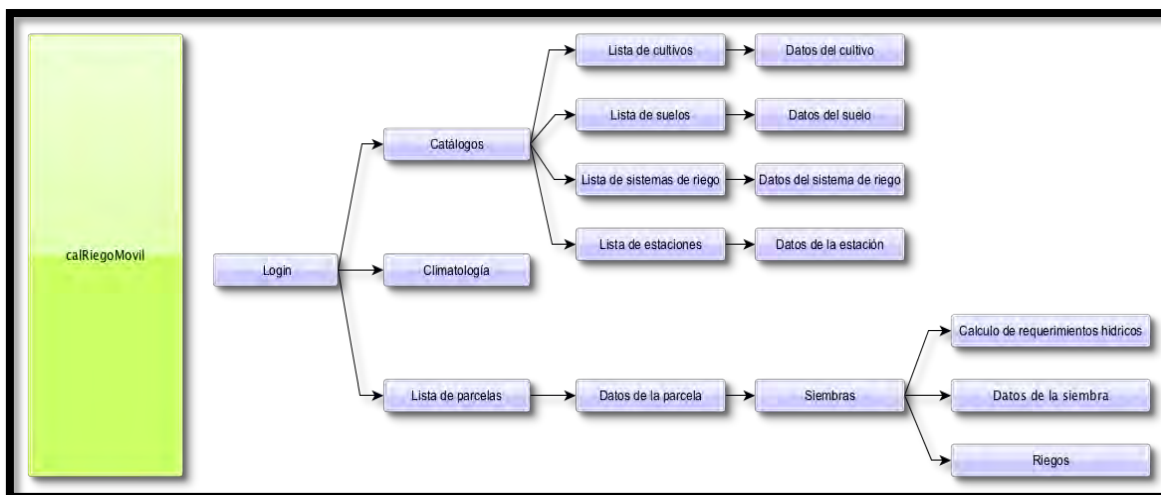


Figura 28. Mapa de aplicación de calRiegoMovil.

calRiegoMovil permite realizar al técnico las siguientes tareas:

1. Visualización de los catálogos:
 - 1.1. Cultivos
 - 1.2. Suelos
 - 1.3. Sistemas de riego
 - 1.4. Estaciones

2. Visualización de la climatología en forma de gráficas referente a un año específico.
3. Visualización de la información de las parcelas asignadas a un técnico, así como:
 - 3.1. Dar de alta nuevas siembras o editar las existentes dentro de cada parcela.
 - 3.2. Asignar nuevos riegos a las parcelas.
 - 3.3. Ver los requerimientos hídricos de cada parcela.
 - 3.4. Ver los datos en forma de gráficas.

La aplicación móvil funciona bajo el sistema operativo Android y utiliza una base de datos SQLite para administrar la información. La versión mínima de Android requerida para que funcione correctamente es la 2.3 Gingerbread.

2.4.2.2 Acceso a la aplicación móvil.

La aplicación presenta como inicio, una pantalla de Login, donde se debe especificar un nombre de usuario y una contraseña para poder tener acceso. Los datos requeridos para utilizar la aplicación, son los del técnico al que se le ha proporcionado el dispositivo móvil y tendrá únicamente la información relacionada al técnico especificado. La Figura 29 muestra la ventana de login para poder tener acceso a la aplicación.

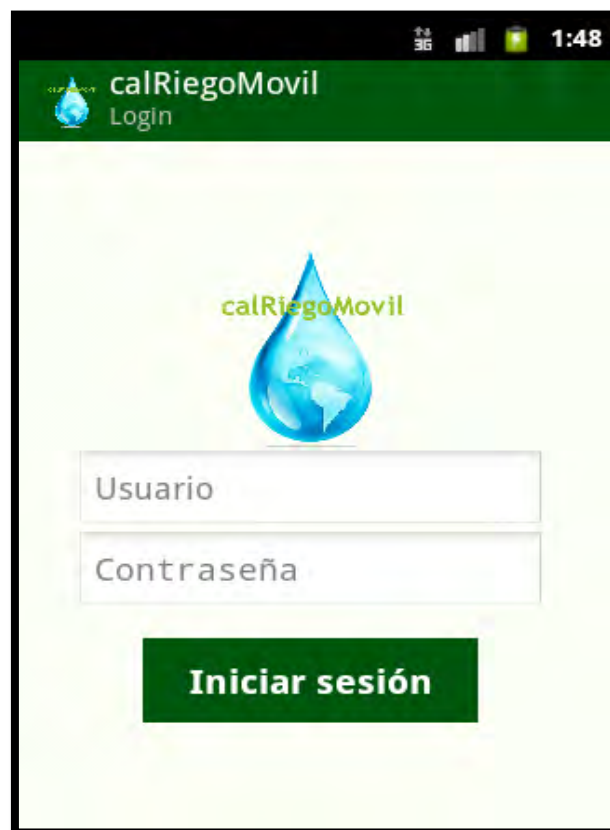


Figura 29. Pantalla de login para tener acceso a la aplicación móvil.

Al proporcionar los datos correctos, se presentará la pantalla principal de la aplicación (Figura 30), en la que se encuentran las opciones desde donde se podrán visualizar los datos correspondientes a; catálogos, climatología y parcelas. Un botón para acceder a los datos de la climatología, un botón para acceder a los datos de las parcelas y un menú con la opción para cerrar la sesión actual. En la barra de información, a modo de subtítulo se muestra en nombre del usuario que inicio sesión en la aplicación.

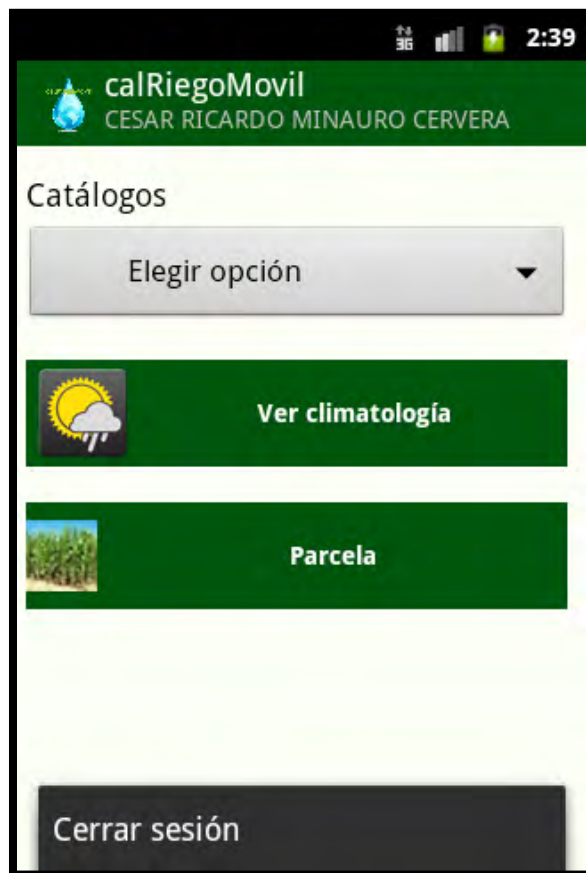


Figura 30. Pantalla principal de la aplicación callRiegoMovil.

2.4.2.3 Actualización de información.

2.4.2.3.1 Visualización de catálogos.

En la pantalla principal se visualiza una lista con los catálogos: Cultivo, Suelo, Sistemas de riego, Estaciones. Cada elemento de la lista funciona como un botón de acceso a cada uno de ellos.



Figura 31. Pantalla con el listado de catálogos de la aplicación.

2.4.2.3.2 Catálogo de Cultivos

Al seleccionar la opción de 'Cultivo', se muestra una lista con los cultivos disponibles, y en la parte superior de la pantalla, se encuentra un campo de texto, en el cual el usuario, puede introducir una palabra, que sirve como filtro de búsqueda, en base al nombre del cultivo.



Figura 32. Catálogo de cultivos.

Cada elemento de la lista funciona como un botón de acceso que al ser elegido, en otra pantalla se muestra la información del cultivo que se ha seleccionado. Los datos del cultivo que se muestran en la pantalla son: Clave del cultivo, Nombre del cultivo, T_{max}, T_{min}, K_{max}, X_{kmax}, P_{rmax}, K_{co}, D_{g cosecha}, a₀, a₁, a₂, a₃, a₄, Pro. La Figura 33 nos muestra la pantalla con los datos de los cultivos.



Figura 33. Datos del cultivo.

2.4.2.3.3 Catálogo de Suelos

Al seleccionar la opción de 'Suelo', muestra una pantalla con la lista de los suelos disponibles, al igual que la pantalla de cultivos, la lista tiene el mismo funcionamiento, donde cada elemento de la lista funciona como un botón.

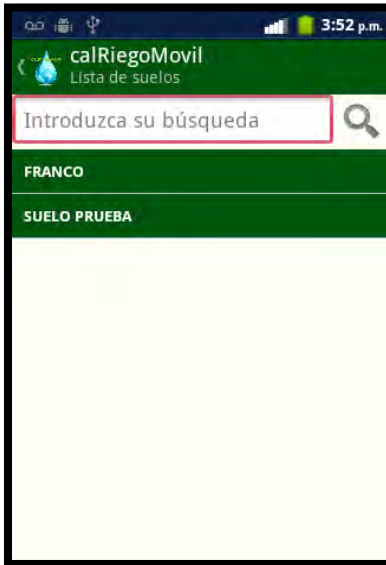


Figura 34. Catálogo de suelos.

Al elegir un objeto de la lista, se muestra una pantalla con la información de forma detallada del suelo seleccionado. Los datos del suelo que se muestran son los siguientes: clave del suelo, tipo del suelo, valor del pmp, valor del cc y valor de la ha. La Figura 35 muestra la pantalla con los datos del suelo.



Figura 35. Datos del suelo.

2.4.2.3.4 Catálogo de sistemas de riego

Opción de 'Sistema de riego', en esta pantalla se muestra, una lista con los sistemas de riego, y también se puede realizar una búsqueda en base a un parámetro.

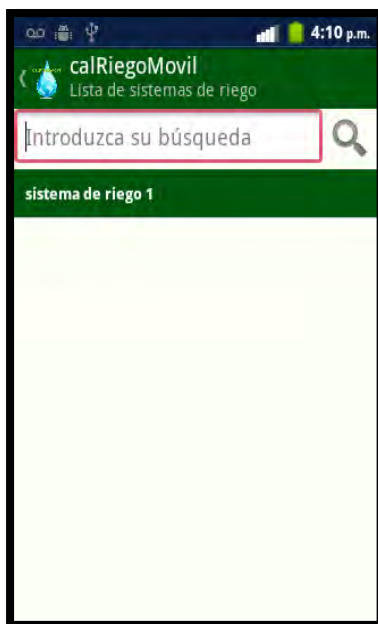


Figura 36. Catálogo de Sistemas de Riego.

Al seleccionar un elemento de la lista, se muestra la información del sistema de riego seleccionado.

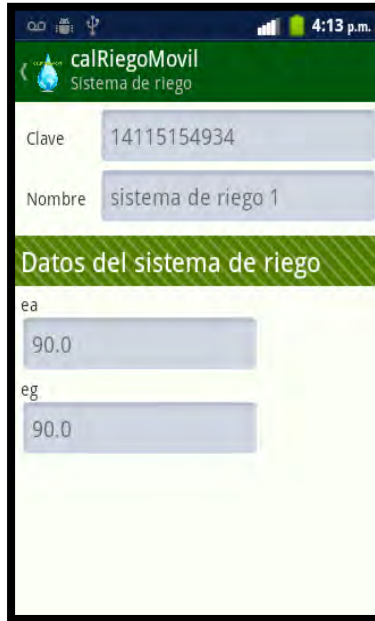


Figura 37. Datos del Sistema de Riego.

2.4.2.3.5 Catálogo de Estaciones climatológicas

Al elegir la opción de 'Estación', se muestra el catálogo de las estaciones climatológicas, que funciona de la misma manera que las listas de los catálogos anteriormente mencionados.

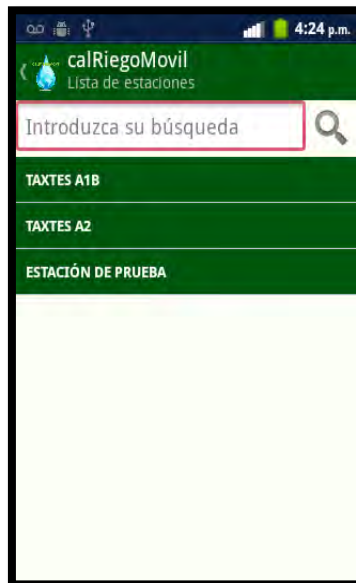


Figura 38. Catálogo de estaciones climatológicas.

Al elegir un elemento, se muestra su información detallada en otra pantalla. Los datos que se muestran son los siguientes: Clave de la estación, nombre de la

estación, latitud, altitud, longitud, altura del sensor del viento y diferencia horaria.

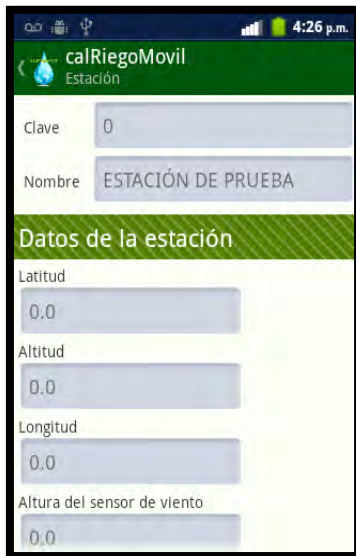


Figura 39. Datos del Sistemas de estaciones climatológicas.

2.4.2.3.6 Climatología.

Dentro de la pantalla principal, se encuentra la opción de 'Ver climatología', se puede visualizar la información del estado del clima para la estación especificada, en forma de gráfica, dependiente de los valores seleccionados, es la forma en la que se comportará la gráfica.

Los parámetros que se utilizan para definir los datos que se van a graficar son: estación, año, mes, dato climatológico (ET0, Tmedia, Precipitación). Ejemplo de la gráfica del ET0 y la unidad de medida son los milímetros (mm).



Figura 40. Ejemplo de gráfica de ET0 desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014.

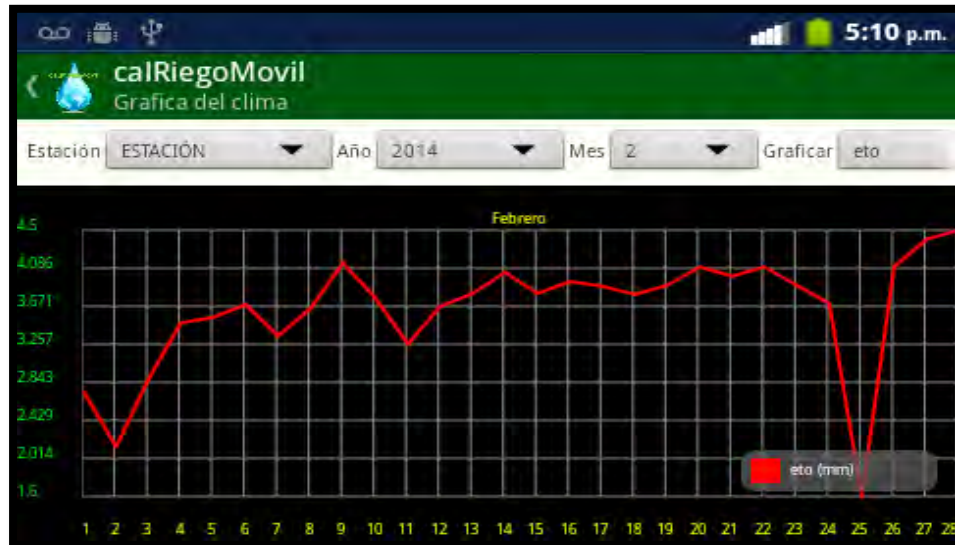


Figura 41. Ejemplo de gráfica de ET0 desde la aplicación móvil para simulación de febrero del 2014.

Como se menciona anteriormente, se muestran cuatro listas, que permiten la interacción del usuario con la gráfica. El primer valor disponible para elegir, es la estación climatológica. Una vez especificada la estación, en la segunda lista, se cargarán los años disponibles para esa estación. Al elegir un año, en la tercera lista, se muestran los meses disponibles para el año elegido.

Como se menciona anteriormente, se muestran cuatro listas, que permiten la interacción del usuario con la gráfica. El primer valor disponible para elegir, es la estación climatológica. Una vez especificada la estación, en la segunda lista, se cargarán los años disponibles para esa estación. Al elegir un año, en la tercera lista, se muestran los meses disponibles para el año elegido. Al haber especificado los tres valores anteriores, por defecto en la cuarta gráfica, se encuentra seleccionado la variable climatológica ET0, y se mostrara su gráfica. También se puede elegir la variable Tmedia o la Precipitación. En el eje Y se muestra el valor en mm, y sobre el eje X se muestra el día del mes, en la parte superior de la gráfica, se muestra el nombre del mes.



Figura 42. Ejemplo de gráfica de Tmedia desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014.



Figura 43. Ejemplo de gráfica de Tmedia desde la aplicación móvil para simulación de febrero del 2014.

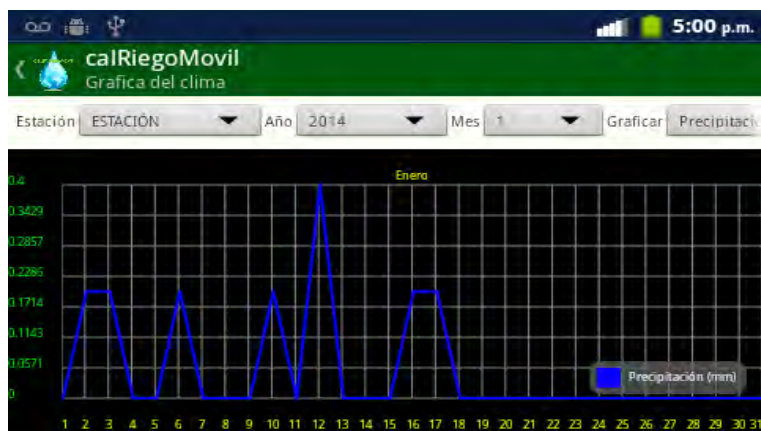


Figura 44. Ejemplo de gráfica de Pp desde la aplicación móvil para simulación de enero del 2014.

2.4.2.3.7 Administración de parcelas.

La aplicación permite también la administración de parcelas, cada técnico, tiene a su cargo una cantidad de parcelas que debe supervisar. En la pantalla principal se encuentra en botón Parcela, el cual nos permite tener acceso a la administración de las parcelas que tiene a su cargo el usuario. Al presionar el botón de Parcela, se muestra una lista con el catálogo de parcelas de que tiene el usuario a su cargo.

La lista muestra algunos datos de la parcela, como son; el número de cuenta de la parcela, el nombre del dueño, y la superficie total de la parcela. Cada elemento de la lista, funciona como un botón el cual tiene un evento que al interactuar con el usuario, permite que se muestre la información detallada de la parcela seleccionada. Al seleccionar un elemento, como cabecera se muestra la clave de la parcela, y los datos restantes se visualizan en forma de pestañas, divididos en: datos generales, datos geográficos, datos del dueño, datos del técnico, siembras. En la primera pestaña se muestra la información general de la parcela, se muestran los siguientes datos: cuenta, subcuenta, tenencia, distrito, modulo, zona, sección, estado y municipio.

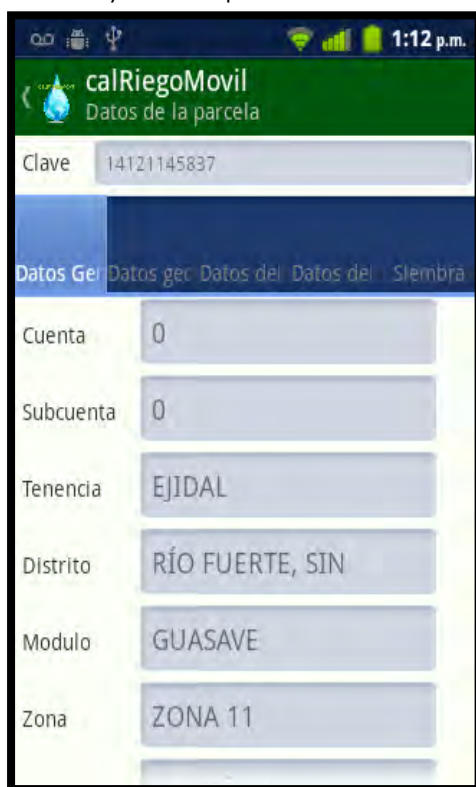


Figura 45. Pantalla de con pestaña 1 de información de parcelas.

En la segunda pestaña se muestra la información geográfica de la parcela, con la finalidad de tener datos de ubicación precisos. Los datos que se muestran, son los siguientes: superficie física, latitud, longitud, altitud y estación climatológica.



Figura 46. Pantalla de con pestaña 2 de información de parcelas.

En la tercera pestaña se visualiza la información del dueño de la parcela, tales como: nombre del dueño, e-mail, teléfono y dirección.

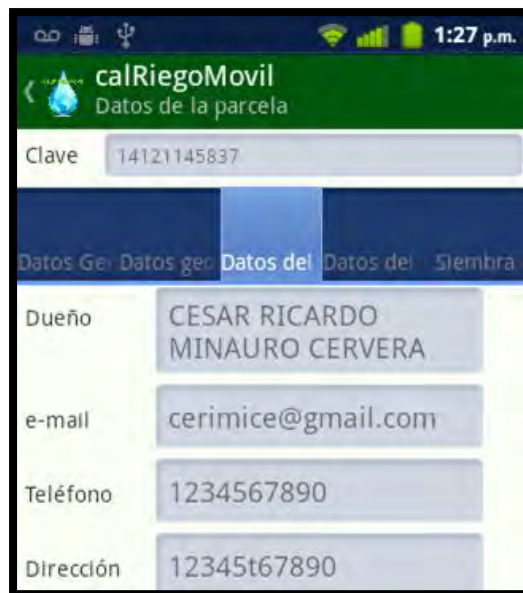


Figura 47. Pantalla de con pestaña 3 de información de parcelas.

En la cuarta pestaña, se muestra la información del técnico que está a cargo de supervisar la parcela. Los datos que se muestran del técnico:

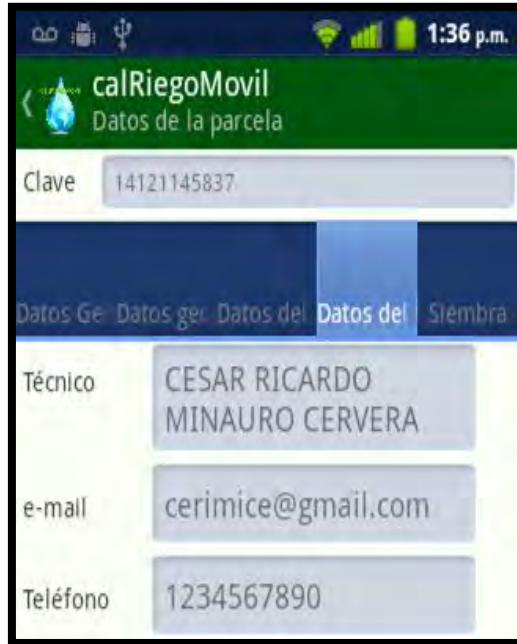


Figura 48. Pantalla de con pestaña 4 de información de parcelas.

En la quinta pestaña se muestran las siembras asociadas a la parcela. Esta pestaña tiene más funcionalidades que las anteriores, ya que permite la administración de las siembras. En la pantalla se muestra como inicio, una lista con los años agrícolas disponibles para las siembras de la parcela, al mismo tiempo la lista funciona como filtro para mostrar las siembras en la parte inferior como una lista, debajo de los años agrícolas, se muestra el campo de la superficie total de la parcela, y le sigue el campo de la superficie sembrada de la parcela. El valor del campo Superficie sembrada, se calcula, restando a la superficie total de la parcela, la suma de la superficie de las siembras activas, asociadas a la parcela.



Figura 49. Pantalla de con pestaña 5 de información de parcelas.

En la parte inferior se muestra la lista de las siembras que pertenecen a la parcela, filtradas por el año agrícola, donde a modo de tabla, se muestran datos de la siembra, tales como: año agrícola, ciclo, cultivo, superficie y estado.

AÑO AGRÍCOLA	CICLO	CULTIVO	SUPERFICIE	ESTADO
2013 - 2014	OTOÑO - INVIERNO	PAPA PRUEBA	20.0	Activa
2013 - 2014	OTOÑO - INVIERNO	MAÍZ	30.0	No Activa
2013 - 2014	OTOÑO - INVIERNO	ALFALFA	20.0	Activa
2013 - 2014	OTOÑO - INVIERNO	PAPA PRUEBA	50.0	Activa

Figura 50. Pantalla de siembras por parcela.

En esta pestaña se permiten dos tareas, la primera es editar las siembras de la parcela, y la segunda es agregar una nueva siembra a la parcela. Para editar una siembra, solo se debe seleccionar un elemento de la lista, y se mostrará una pantalla con la información del elemento seleccionado.

Figura 51. Pantalla para edición de siembras.

Los datos que se permiten editar son: año agrícola, ciclo, cultivos, suelo, sistema de riego, superficie sembrada, fecha de siembra, fecha de cosecha y estado de la siembra (Activa o No activa).

Los primeros dos campos, el de clave de la parcela y la clave de la parcela, no son editables, ya que pertenecen a la parcela que se haya seleccionado anteriormente.

Si se quiere editar cualquiera de estos datos, se debe cambiar los datos de cualquier de las listas, si se necesita cambiar la fecha de siembra o de cultivo, se debe presionar el icono del calendario, y se mostrará en pantalla un selector de fecha, y en el campo de texto se mostrará la fecha elegida. Una vez que se han definido los datos, se presiona el botón menú del dispositivo y se aparecerá la opción de Guardar.



Figura 52. Pantalla de guardar modificaciones de una siembras.

Al elegir la opción de guardado, los cambios serán almacenados dentro de la base de datos, para la siembra especificada.

2.4.2.3.8 Nueva siembra

Si se tiene la necesidad de dar de alta una nueva siembra, se presiona el botón menú del dispositivo y se mostrara en la opción de Nueva siembra.



Figura 53. Agregar datos de nueva siembra.

Si se elige la opción de Nueva siembra, se mostrará la misma pantalla de la edición, pero la diferencia es que el campo de la clave de la siembra, se encuentra vacío, la clave se genera de forma automática, en el campo Parcela, se muestra la clave de la parcela, a la que pertenecerá la nueva siembra.

Para dar de alta la nueva siembra en la base de datos, al igual que en la pantalla de edición, se presiona el botón menú del dispositivo y se elige la opción de guardar, a diferencia de la edición, la nueva siembra se agregará a la lista de las siembras en la pantalla de la Parcela.

Cuando se va a dar de alta una nueva siembra, el campo de superficie sembrada, se calcula de forma automática, el valor puede ser modificado, y deberá cumplir los siguiente: la superficie de la siembra no deberá ser menor o igual a 0, y no podrá exceder el valor especificado, ya que representa la superficie que queda disponible de la parcela.



Figura 54. Pantalla de modificar datos de siembra.

2.5 2.5. Puesta en marcha

2.5.1 2.5.1. Instalación de la aplicación bajo equipo con sistema operativo Debian 6

2.5.1.1 Instalación de base de datos: MySQL

MySQL es un sistema gestor de bases de datos relacionales muy completo y muy

utilizado diferentes entornos principalmente para el desarrollo de aplicaciones web. La versión más recomendable para instalar es la que se encuentra dentro de los repositorios de software de Debian, debido a que esta se encuentra mantenida y en caso de tener errores y vulnerabilidades estas serán corregidas y se contara con la actualización lo más pronto posible.

1.- Instalación de MySQL: para la instalación del servidor y el cliente de MySQL, debemos instalar los paquetes *mysql-server*, *mysql-common* y *mysql-client* mediante *apt-get*:

```
#sudo apt-get install mysql-server mysql-common mysql-client
```

Esto nos pedirá que se ingrese la contraseña que pertenecerá al usuario root

2.- Arranque y parada de mysql: el servidor de datos mysql, al igual que todos los servicios en Debian, dispone de un script de arranque y parada en la carpeta */etc/init.d/*

Para Iniciar o reiniciar el servidor mysql:

```
#sudo /etc/init.d/mysql restart
```

Parar el servidor mysql:

```
#sudo /etc/init.d/mysql stop
```

3.- Acceso a MySQL: para tener acceso a la base de datos relacional, es necesario ingresar como un usuario previamente registrado, en una instalación reciente el único usuario es root, y para el acceso se utiliza la siguiente instrucción:

```
#mysql -u root -p
```

2.5.1.2 Instalación de java: JDK

El primer paso para realizar la instalación de Java Development Kit (SDK) de Java es realizar los siguientes pasos:

1. La descarga desde el portal de internet siguiente:

```
http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html
```

Guardar el archivo en una ubicación general, por defecto se descarga en la carpeta "Descargar" ubicada en el directorio siguiente: */home/usuario/Descargas*, en donde "usuario", es el nombre del usuario en sesión en ejecución.

2.- Ingresamos al directorio en el cual se descargó el archivo y lo descomprimos

por medio del siguiente comando:

```
#tar xzfv jdk-version-sistemaOperativo-arquitectura.tar.gz
```

3.- Mover los archivos a una carpeta de ejecución del sistema, donde sea posible colocarlo de manera disponible y accesible, el directorio recomendado es `/usr/software/java`, para realizar esta operación es necesario ejecutar lo siguiente:

```
#sudo mv jdk-version /usr/software/java
```

4.- Definir las variables de entorno dentro del archivo `/etc/profile` para la correcta ejecución del JDK, las cuales corresponden a las siguientes:

```
export JAVA="/usr/programas/java/jdk1.8.0_05/bin"  
export JAVA_HOME="/usr/programas/java/jdk1.8.0_05"  
export PATH=$SQLITE_HOME:$CDATA_HOME:$JAVA:$JAVA_HOME:$PATH
```

5.- Es necesario reiniciar el sistema para dar de alta las nuevas variables de entorno.

6.- Para realizar la prueba de la instalación del JDK es necesario abrir una terminal y ejecutar el comando siguiente:

```
#java -version
```

Esto mostrara un mensaje, lo que nos confirma la correcta instalación del JDK.

2.5.1.3 Instalación de contenedor de servlets: Servidor Apache Tomcat

Para tener un control de todos los aspectos de la instalación del contenedor de servlets Apache Tomcat, manejar las variables de entorno necesarias para ejecutar el servidor y configurar el sistema para que tenga fácil acceso a la línea de comandos se realizar una instalación manual del este contenedor de servlets.

Es necesario tener instalado el JDK y configurada la variable de entorno `JAVA_HOME`, al momento de realizar esta configuración, este procedimiento se realiza sobre Debian 6 AMD64 y JDK AMD64.

1.- Descarga del contenedor de servlets: lo primero que haremos es bajar nuestra versión en formato tar.gz de Apache Tomcat 7 de la siguiente dirección:

```
http://tomcat.apache.org/whichversion.html
```

2.- Descompresión, ingresamos al directorio en el cual se descargó el archivo y lo descomprimos por medio del siguiente comando:

```
#tar xzfv apache-tomcat-version.tar.gz
```

3.- Mover el contenido a una carpeta de ejecución del sistema con privilegios de usuario común, donde sea posible colocarlo de manera disponible y accesible, el directorio recomendado es `/home/usuario/apache-tomcat`, para realizar esta operación es necesario ejecutar lo siguiente:

```
#mv apache-tomcat-version /home/usuario/apache-tomcat
```

4.- Configurar usuarios: para realizar este procedimiento es necesario ubicarnos en el directorio principal en donde se encuentra ubicado el servidor, para ello ejecutamos la siguiente sentencia:

```
#cd /home/usuario/apache-tomcat
```

Una vez dentro nos movemos al directorio denominado `conf`, dentro del cual se encuentra el archivo `tomcat-users`, en este archivo debemos agregar la configuración de los usuarios, para ello agregamos las líneas siguientes:

```
<role rolename="manager-gui"/>  
<user username="usuario1" password="passwordUsuario1" roles="manager-gui"/>  
<user username="usuario2" password="passwordUsuario2" roles="manager-gui"/>  
<user username="usuario3" password="passwordUsuario3" roles="manager-gui"/>
```

Para conocer más acerca de los usuarios posibles es necesario revisar el contenido de la documentación.

5.- Arrancar servidor: el siguiente paso consiste en arrancar el servidor contenedor de servlets: tomcat y probar su funcionamiento, para esto abrimos una terminal Linux, posteriormente nos movemos al directorio que contenedor del servidor de la siguiente manera:

```
#cd /home/usuario/apache-tomcat/bin
```

Es necesario conocer dos instrucciones para iniciar y para detener el servidor, estas se encuentran dentro del directorio `~/bin`:

Para iniciar el servidor:

```
#startup.sh
```

Para detener el servidor:

```
#shutdown.sh
```

Ahora el paso final consiste en abrir el navegador web y tecleamos en la barra de direcciones `http://localhost:8080` y se mostrara la ventana Apache Tomcat, la cual nos muestra la pantalla de bienvenida de Apache Tomcat, esto quiere decir que todo se ha configurado exitosamente.

2.5.1.4 Despliegue del proyecto

Una forma sencilla de compartir aplicaciones web es por medio de los archivos WAR (Web Application Archive) el cual es un archivo utilizado para distribuir una colección de JavaServer Pages, servlets, clases Java, archivos, librerías y páginas web estáticas que juntos constituyen una aplicación web.

Para el efecto de calRiegoWeb se cuenta con un archivo de estas características que puede ser desplegado en cualquier servidor contenedor de servlets, en este caso se describe el proceso para desplegarlo dentro de un servidor Apache Tomcat, para ello se realiza el siguiente procedimiento:

1.- Acceso al Administrador: cada uno de los diferentes contenedores de servlets cuenta con una herramienta de administración de aplicaciones ya desplegadas, para el caso del Apache Tomcat solo es necesario colocar en el navegador web del servidor la siguiente dirección:

<http://localhost:8080/manager>

En este punto el navegador nos solicitará un usuario y contraseña, el cual debe encontrarse configurado en el archivo de tomcat-users.xml.

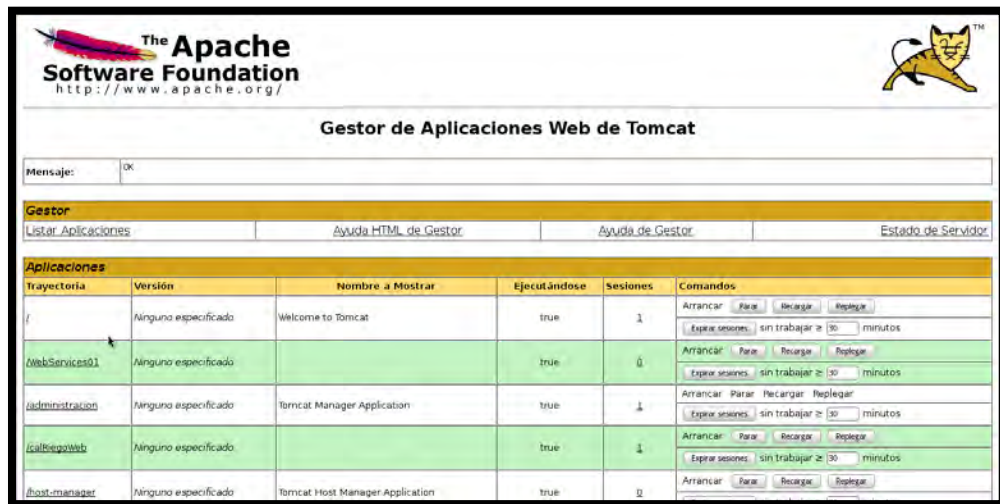


Figura 55. Gestor de aplicaciones de Apache Tomcat.

2.- Despliegue del archivo WAR: en la parte inferior del gestor de aplicaciones se encuentra la sección "Desplegar", la cual tiene dos opciones:

- Desplegar directorio o archivo WAR localizado en servidor: esta es utilizada cuando el archivo WAR a desplegar se encuentra en una ubicación diferente a la física.
- Archivo WAR a desplegar: esta se utiliza cuando el archivo WAR se encuentra en la misma máquina, de tal manera que esta es la utilizada de manera predeterminada.

Una vez identificada la forma de despliegue a realizar se procede a seleccionar el archivo y presionar el botón de despliegue, este proceso puede tardar varios minutos, todo depende del tamaño del archivo y ancho de banda disponible.

3.- Acceso a la aplicación: una vez desplegado el archivo podemos referirnos a la sección de "Aplicaciones" en donde veremos cargada la aplicación con el mismo nombre del archivo WAR desplegado.

Aplicaciones					
Trayectoria	Versión	Nombre a Mostrar	Ejecutándose	Sesiones	Comandos
/	Ninguno especificado	Welcome to Tomcat	true	1	<input type="button" value="Arrancar"/> <input type="button" value="Parar"/> <input type="button" value="Recargar"/> <input type="button" value="Replegar"/> <input type="button" value="Esperar sesiones"/> sin trabajar ≥ 30 minutos
/WebServices01	Ninguno especificado		true	0	<input type="button" value="Arrancar"/> <input type="button" value="Parar"/> <input type="button" value="Recargar"/> <input type="button" value="Replegar"/> <input type="button" value="Esperar sesiones"/> sin trabajar ≥ 30 minutos
/Administracion	Ninguno especificado	Tomcat Manager Application	true	1	<input type="button" value="Arrancar"/> <input type="button" value="Parar"/> <input type="button" value="Recargar"/> <input type="button" value="Replegar"/> <input type="button" value="Esperar sesiones"/> sin trabajar ≥ 30 minutos
/calRiegoWeb	Ninguno especificado		true	1	<input type="button" value="Arrancar"/> <input type="button" value="Parar"/> <input type="button" value="Recargar"/> <input type="button" value="Replegar"/> <input type="button" value="Esperar sesiones"/> sin trabajar ≥ 30 minutos
/host_manager	Ninguno especificado	Tomcat Host Manager Application	true	0	<input type="button" value="Arrancar"/> <input type="button" value="Parar"/> <input type="button" value="Recargar"/> <input type="button" value="Replegar"/> <input type="button" value="Esperar sesiones"/> sin trabajar ≥ 30 minutos

Figura 56. Aplicaciones desplegadas en el Gestor de Apache Tomcat.

Para tener acceso a la aplicación solo hace falta colocar la dirección en el navegador web la cual es:

<http://localhost:8080/calRiegoWeb>



Figura 57. Página de acceso a la aplicación.

2.5.2 Por medio de máquina virtual VMware Player

2.5.2.1 Instalación de VMware Player en sistema operativo Linux

VMware Player es un programa que puedes obtener de forma gratuita y que te permite ejecutar máquinas virtuales creadas con VMware Player Workstation, VMware Player GSX Server o VMware Player ESX Server, e incluso máquinas virtuales en formatos Microsoft y archivos generados con Symantec LiveState Recovery.

Aunque se instala de forma automática al instalar versiones de evaluación de otros productos como VMware Player Workstation, también podemos instalarlo de forma independiente.

Una de las mayores limitaciones que presenta es la de no poder crear nuevas máquinas virtuales, ya que está pensado para poder utilizar las que hayamos generado con alguno de los productos con los que es compatible. Sin embargo, aquí veremos que hay alternativas que nos permiten soslayar esta limitación.

VMware Player no es software de código abierto, pero es gratuito. Incluso se puede redistribuir, siempre que se atiendan una serie de directrices.

1.- Descarga: para comenzar, debes dirigirte al sitio de descarga de VMware Player, que se encuentra en la dirección <http://www.VMware.com/download/player/> y seguir el procedimiento para obtener el software.

2.- Instalación: una vez concluida la descarga, debes abrir una terminal y desplazarte hasta el lugar donde se ha guardado el archivo descargado. Por consiguiente se utiliza la siguiente orden:

```
cd /home/usuario/Escritorio/
```

Después, para iniciar la instalación, debes escribir lo siguiente:

```
sudo sh VMware Player-Player-2.5.2-156735.i386.bundle
```

Esto inicia el proceso de instalación de VMware Player que, al contrario de lo que abría de esperar, es completamente gráfico. En la ventana que se abre sólo hay que hacer clic sobre el botón Install. La figura 49 muestra la ventana de inicio de la instalación del VMware Player.

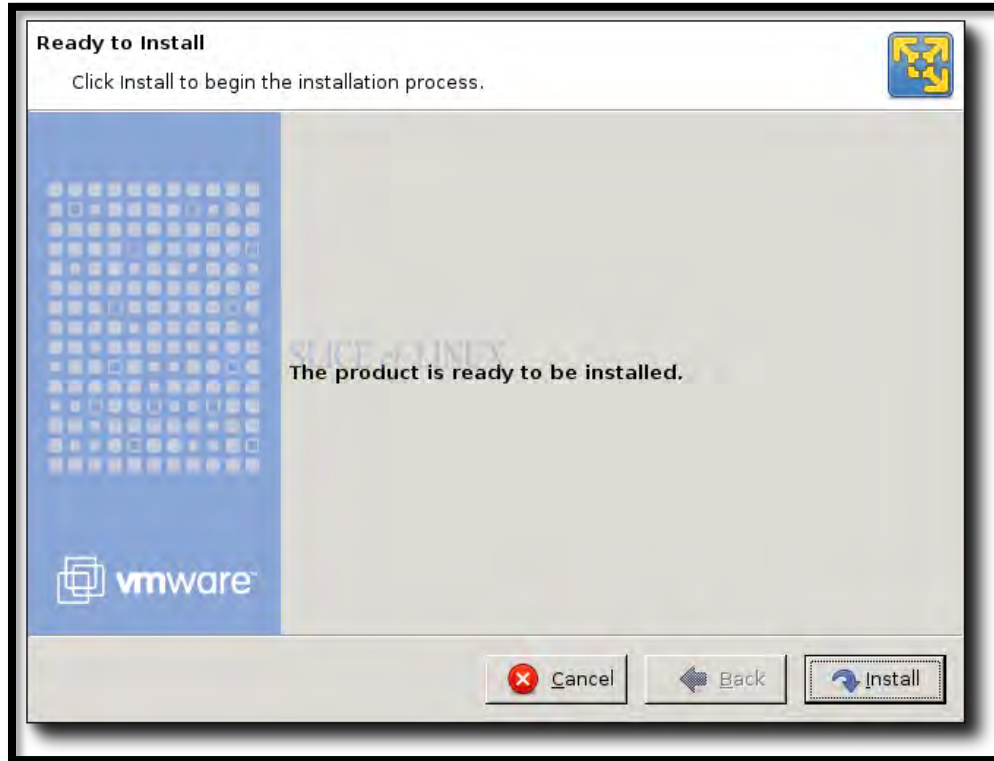


Figura 58. Instalación de VMware Player.

Lo siguiente a ver será una barra de proceso que te indica el avance de la tarea de copia y configuración de los archivos que forman el programa y cuando la barra llega a su fin, es sustituida por un mensaje que informa de que la instalación ha concluido. Sólo queda hacer clic en el botón Close.

2.5.2.2 Ejecutar máquina virtual previamente creada

Para ejecutar una máquina virtual por medio del VMware Player es necesario contar con un archivo de máquina virtual, generalmente son ubicados por medio de las extensiones vmx, ovf u ova. De esta manera es fácil contar con una copia de respaldo del sistema completo y de la plataforma de aplicaciones. Una desventaja de utilizar máquinas virtuales radica en que es necesario contar con una interfaz gráfica. Para inicializar la maquina es necesario realizar los siguientes pasos:

1.- Arrancar la aplicación VMware Player: esta aplicación se encuentra ubicada en *Aplicaciones -> Herramientas del sistema -> VMware Player* este script se encarga de cargar la aplicación.

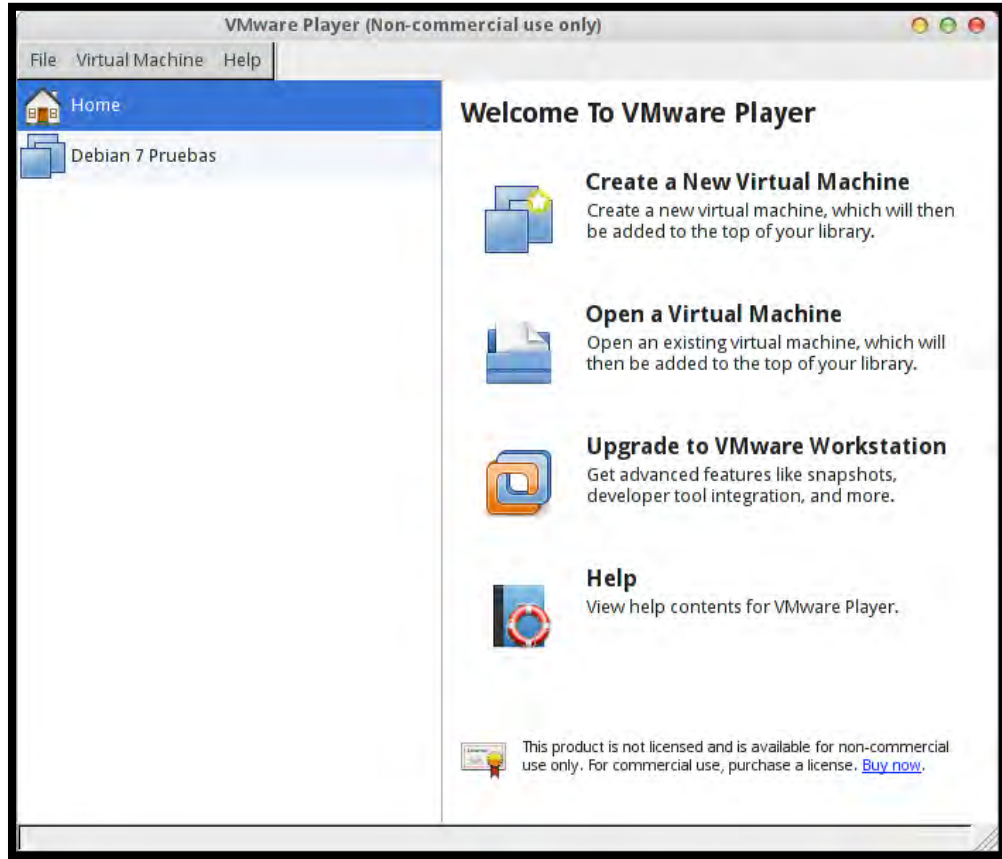


Figura 59. Arrancar VMware Player en sistema operativo Linux.

2.- Selección del archivo: para ello es necesario ubicar el archivo de la máquina virtual dentro de los medios de almacenamiento.

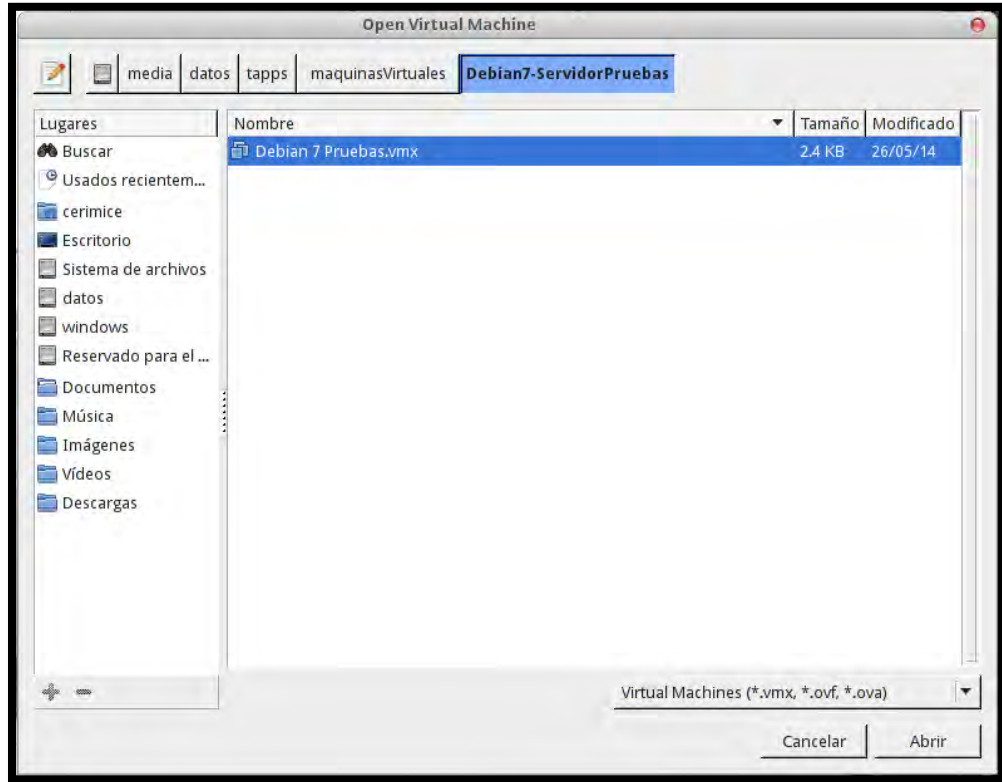


Figura 60. Ubicar el archivo de máquina virtual.

3.- Inicializando máquina virtual: una vez seleccionado el archivo se procede de manera automática el arranque de la máquina virtual y con ello el cargado del sistema operativo, en este caso sería Linux Debian 7.



Figura 61. Sistema operativo cargado en máquina virtual.

**INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN HIDRANTE PARCELARIO
AUTOMATIZADO PARA LA ENTREGA VOLUMÉTRICA EN
MÓDULOS DE RIEGO**

INTRODUCCIÓN

La importancia de la dotación volumétrica se basa en el principio de equidad en el reparto de aguas a los usuarios de los distritos de riego y se requiere aplicar, para lograr los beneficios que deben producir, "el buen uso del agua en la producción agrícola".

La creciente necesidad de racionalizar los recursos hídricos en el sector del riego ha obligado a la introducción de nuevas tecnologías que permitan un mayor control del agua aplicada y por tanto un mayor ahorro de las dotaciones totales a suministrar. En los últimos años, los sistemas de distribución del agua a presión están sustituyendo al resto de formas de distribuir agua, principalmente en los tramos finales que llegan al usuario, por las múltiples ventajas que esto supone a distintos niveles.

No obstante, debido al constante incremento en el costo de la energía, el riego por gravedad sigue siendo por mucho la principal forma de aplicar el agua a los cultivos, llegando a ocupar a nivel modulo hasta el 98 % de la superficie total regada. Esto es un indicador claro de donde es necesario la tecnificación del riego.

Entre las hipótesis para mejorar el rendimiento y la calidad del fruto es el incremento en la frecuencia de riego; en maíz por ejemplo, donde tradicionalmente se dan 4 riegos, si este se incrementa a 5, es suficiente para incrementar la producción hasta en un 10%. Con esta premisa se resalta la importancia de la automatización del sistema de entrega volumétrica, mediante dispositivos remotos que aporten flexibilidad y certeza en el control del volumen entregado.

Con este trabajo se muestra una opción para la automatización del sistema de entrega de agua en la entrega volumétrica de agua a nivel parcelario, comúnmente conocido como sistema GOOTEM.

3.1.1 Marco de Referencia

La introducción de nuevas tecnologías de riego en parcela obligan, en la mayoría de los casos, a realizar obras de infraestructura de orden colectivo cuyo objeto sea entre otros, la captación, el almacenamiento y regulación del agua de riego y su posterior transporte y distribución hasta parcela cubriendo unos requerimientos mínimos de caudal y presión que garanticen el correcto funcionamiento del sistema de riego adoptado.

Los hidrantes son uno de los dispositivos que permiten la entrega controlada del agua a nivel parcelario mediante sistemas de apertura y cierre; consisten de una válvula hidráulica de doble cámara y un contador de agua tipo Woltman, que minimizan el espacio de instalación y están especialmente diseñados para el control remoto y automatizado de las redes hidráulicas agrícolas.

Los hidrantes pueden llevar incorporados diferentes pilotajes de control hidráulico,

dependiendo de los requerimientos del cliente: reductor de presión, limitación de caudal, etc.

Así mismo existen dispositivos electrónicos que permiten el control volumétrico del agua en la parcela mediante hidrantes inteligentes con programadores avanzados, los cuales podemos encontrar en el mercado como los sistemas de riego de Telecontrol.

3.1.2 Gootem GR

Es un sistema que permite gestionar estaciones de bombeo, de abonado, contabilizar y facturar el agua consumida además de exhaustivos protocolos de seguridad; ofrece un Sistema robusto y fiable que permite la gestión y el control absoluto de la instalación, disponer de toda la información y manejarla según sus necesidades, optimizando el aprovechamiento del agua, los medios necesarios y los costes implicados.

Habitualmente en la agricultura siempre se han utilizado simples programadores de riego o el tradicional riego a manta supervisado por la persona responsable, pero a diferencia de estos sistemas, Gootem ofrece un nivel de automatización muy superior, y además sin cables. Este sistema ofrece una amplia gama de posibilidades a la hora de controlar el riego a distintos niveles: Por sectores, por válvula, por parámetros de temperatura y/o humedad, y todo desde un único puesto de control (PC).

Algunos ejemplos de estas posibilidades son:

- Programación semanal, diaria, a todos los niveles, según se desee.
- Posibilidad de apertura o cierre instantáneo.
- Posibilidad de parar o encender el riego automáticamente en caso de lluvia, viento o en función del nivel de humedad.
- Posibilidad de automatizar sistema antiheladas en función de temperatura y humedad.
- Posibilidad de control de cabezales de riego y abonado.
- Recopilación de históricos de riego. (Útiles para detección de averías)
- Envío de alarmas e informes al teléfono móvil.

3.1.3 Ventajas principales

Hay un incremento en el rendimiento y la calidad de los cultivos programando y controlando la aplicación del riego de cada tipo de planta.

Se minimiza el consumo de agua y reduce los costes de energía, lo cual permite una eficiencia y optimización del recurso, mediante el uso de sensores, contadores y la central meteorológica, consumiendo también menos energía eléctrica.

Su manejo es más fácil, se puede gestionar el proceso de riego desde cualquier lugar, mediante un software muy intuitivo y de fácil manejo instalado en un PC y con el uso de tecnologías inalámbricas.

Se pueden ahorrar costes de instalación y de mano de obra así como también se informa en tiempo real el estado del sistema, el funcionamiento puede ser controlado mediante el software del PC, además el sistema genera multitud de avisos e informes SMS para una mayor robustez y seguridad.

3.1.4 Componentes del sistema

Los componentes del Gootem GR que permiten la gestión de toda una comunidad son las unidades concentradoras, las remotas, el radiomódem y el software (centro de control). Además la posibilidad de conectar PLC'S (con salida modbus) para controlar los cabezales de riego y abonado, distintos tipos de sensores, central meteorológica y módulos modbus en función de las características de la instalación.



Figura 62. Componentes del sistema Gootem GR

3.1.5 Características principales

3.1.5.1 Comunicación inalámbrica

La tecnología inalámbrica ofrece múltiples ventajas frente a una instalación con cable. Gootem GR permite este tipo de tecnologías, con el consiguiente aumento de posibilidades y ahorro en costes y mano de obra.

3.1.5.2 Parada del riego en caso de lluvia o viento

Control de los diferentes cambios meteorológicos (lluvia, vientos y heladas) que permite al usuario reaccionar en tiempo real a las condiciones climáticas, posibilitando un ahorro importante en agua.

3.1.5.3 Sistema de riego modular y flexible

Cada sistema de riego es diseñado y configurado según las características del proyecto y puede aplicarse según las necesidades de crecimiento.

3.1.5.4 Centralización del riego

Al tratarse de un sistema centralizado se simplifica el trabajo, ya que ofrece la posibilidad de vigilar y controlar todo el sistema de riego a golpe de fiesta.

3.1.5.5 Recopilación de históricos de riego

La revisión de estos datos permite advertir de una posible rotura de tubería o de un fallo en la válvula, etc. en caso de que los caudales aumenten o se reduzcan de forma drástica.

3.1.5.6 Independencia y programación especial

Independencia y posibilidad de programación especial en caso de fallo del suministro eléctrico o pérdida de comunicación. Existe un modo de seguridad para salvaguardar la red de riego en caso de fallo del suministro eléctrico o pérdida de comunicación entre elementos.

3.1.5.7 Interfaz gráfica e intuitiva

El software permite definir parcelas, sectores dentro de una misma finca e incluso las válvulas exactas que haya, de modo que se pueda establecer una programación semanal tan concreta como se desee.

3.1.5.8 Ahorro de agua y energía

Se tiene un ahorro importante gracias al sensor humedad, central meteorológica, contadores y registros históricos. Mediante el sensor de humedad se logra un consumo justo de agua para cada tipo de planta o árbol y la central meteorológica permite parar el riego en caso que se esté malgastando agua. Se cuenta también con un protocolo innovador de apertura y cierre de bombas, con la finalidad de que no se produzcan reventones en las tuberías.

3.1.5.9 Envío de alarmas al teléfono móvil

Existe la posibilidad de que el sistema envíe avisos a un teléfono móvil mediante mensajes SMS para alertar al responsable de alguna avería o anomalía, o

simplemente para informar de las aperturas y cierres programados.

Ejemplos de conectividad

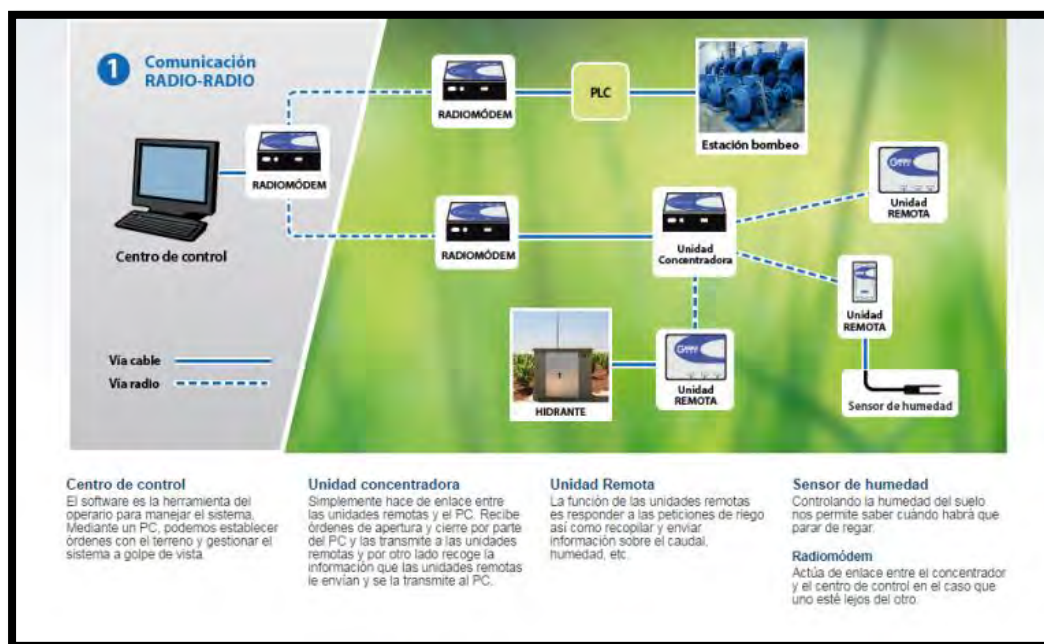


Figura 63. Conectividad del sistema Gootem GR

3.1.6 Software (centro de control)

El software es la herramienta del operario para manejar el sistema. Consiste en un PC con un software SCADA diseñado a medida por expertos informáticos para cada instalación en concreto. Se trata de un software específico de gestión de riego, que comunica con la unidad concentradora y con el PLC para gestionar el proceso de riego.

Desde el centro de control, podemos supervisar y establecer órdenes con el terreno. A través de una interfaz gráfica de cara al usuario, se puede tanto programar el riego de las fincas de forma automática como monitorizar el proceso con los datos que se envíen desde la unidad central (niveles, caudales, contadores). En general el software permite:

- Control de bombas.
- Control de abonado.
- Monitorización de niveles de balsas.
- Proporciona información en tiempo real acerca del proceso de riego en cada hidrante.
- Definir sectores, programar el riego, simplifica la facturación.

El software también presenta otra información de interés como el estado de la

comunicación con los concentradores, el nivel de la batería de las unidades remotas, seguimiento del riego o los datos climáticos recolectados por las estaciones meteorológicas de los concentradores y el estado de los sensores de las unidades remotas.

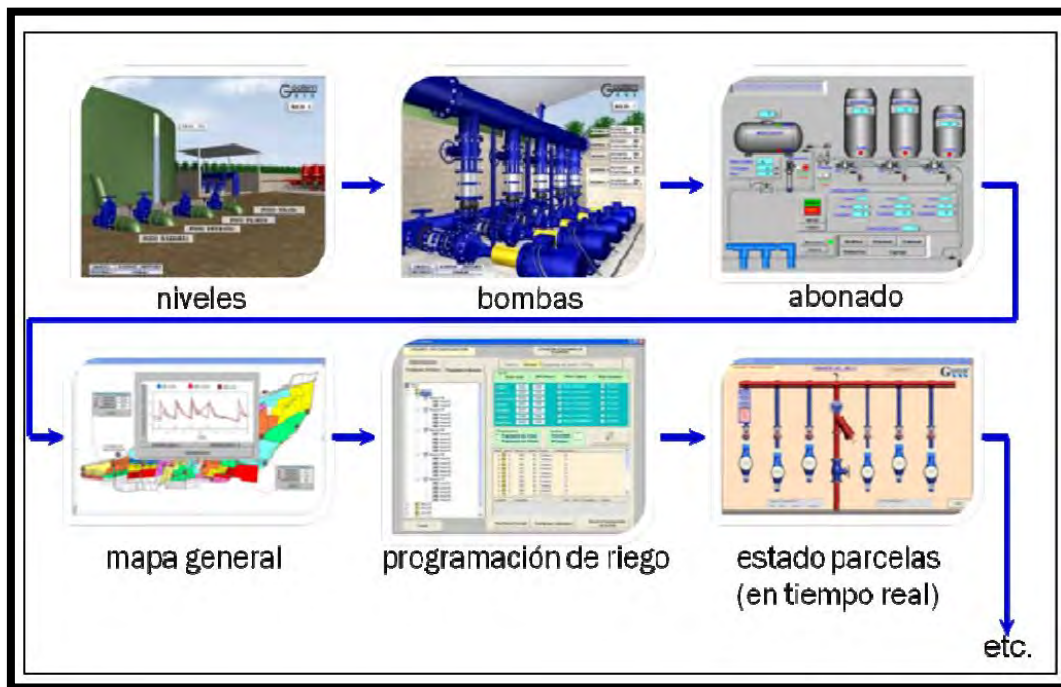


Figura 64. Monitoreo de los diferentes componentes del sistema

3.1.7 Unidad maestra: concentrador

En la solución Gootem GR, el concentrador simplemente hace de enlace entre las unidades remotas y el PC. Recibe las órdenes de apertura y cierre por parte del PC y las transmite a las unidades correspondientes, y por otro lado recoge la información que las unidades remotas le envían (lecturas de sensores y contadores) y se la transmite al PC. Simplemente funciona como enlace bidireccional.

Así pues la unidad central por una parte recopila y almacena la información que proporcionan las unidades remotas poniéndola a disposición del centro de control y por otra, encamina las peticiones de riego de la programación que tiene almacenada hacia la unidad remota correspondiente.



Figura 65. Unidad central almacenadora.

El intercambio de información (datos) con las unidades remotas se realiza vía radio, y con el centro de control por radiomódem o mediante una comunicación serie por cable. Cada concentrador puede gestionar hasta 132 unidades remotas de forma inalámbrica dentro de su zona de cobertura y hasta un máximo de 1584 electroválvulas, 1848 contadores y 528 sensores, pudiendo abarcar mayor cantidad o cubrir zonas más distantes en el mismo sistema de riego utilizando varios concentradores.

3.1.7.1 Unidades remotas

La función de las unidades remotas es responder a las peticiones de riego que realiza el centro de control (PC) mediante una programación previa abriendo o cerrando electroválvulas. También recopila y envía información en tiempo real sobre el caudal, el nivel de humedad y otros datos de interés (según los sensores instalados).



Figura 66. Unidades remotas.

Existen dos tipos de unidades remotas, en función de la capacidad de gestión. Tenemos la unidad remota GR y la unidad remota MN. La primera tiene una capacidad de gestión de hasta 12 electroválvulas, 14 contadores y 4 sensores

analógicos, mientras que la unidad MN sólo controla hasta 4 electroválvulas y 4 contadores o sensores. Las unidades remotas se colocan en los hidrantes donde estén situadas las electroválvulas.

El radio de alcance para establecer la comunicación entre una unidad remota y un concentrador es de 6 km en visión directa. Las unidades remotas se alimentan mediante pilas o paneles solares, según las preferencias del usuario. Las pilas están diseñadas para durar entre 2 y 3 años. Cuando se están agotando, las unidades remotas envían dos avisos al centro de control. El primero se envía cierto tiempo antes del agotamiento previsto de la pila. Cuando se recibe el segundo aviso se cambia la pila inminente.

3.1.7.2 Sensor de humedad

Electronobo aconseja la utilización de al menos un sensor de humedad para determinar el nivel de agua del suelo a distintas profundidades. También existe la posibilidad de trabajar con otros sensores distintos, por ejemplo sensores de nitratos, sensores de pH, de presión, conductividad, etc.

El sensor de humedad, normalmente es analógico, y nos indica mediante un gráfico la progresión de humedad que va adquiriendo el suelo en su profundidad. La idea de usar el sensor de humedad es lograr un mayor aprovechamiento del agua. Cada árbol o planta tiene una longitud máxima de raíz (dato que podemos encontrar en la literatura), con lo que el agua, a partir de esa profundidad, ya no será absorbida. Gracias al sensor de humedad podemos detectar a que profundidad hay agua y parar el riego cuando ésta no vaya a ser asimilada.

El software se encarga de recoger los datos de los distintos sensores y mostrarlos por pantalla, de modo que aportan una ayuda más al técnico encargado para decidir la finalización del riego. Con la ayuda de este sensor utilizaremos sólo el agua necesaria para regar, además mejoraremos la productividad, ya que con una aportación justa de agua, la planta o árbol crece en mejores condiciones.

3.1.7.3 Radio módem

En los casos en los que el centro de control se encuentre ubicado lejos de la unidad concentradora, se hace necesario un elemento que permita la comunicación entre ambos. Esta es precisamente la función del radiomódem.

En muchas ocasiones el centro de control está ubicado en la zona urbana de la ciudad, mientras que los campos agrícolas se encuentran en las periferias. El alcance del concentrador sólo es de 6km en visión directa, y en el interior de una ciudad es prácticamente imposible disponer de visión directa hacia los campos. Cuando ocurre esto Electronobo incorpora el llamado radiomódem. Se conecta un primer radiomódem mediante cable con el centro de control y otro junto al concentrador, de modo que se establece un "cable virtual" entre

ambos de 20km como máximo para que no existan problemas de comunicación.

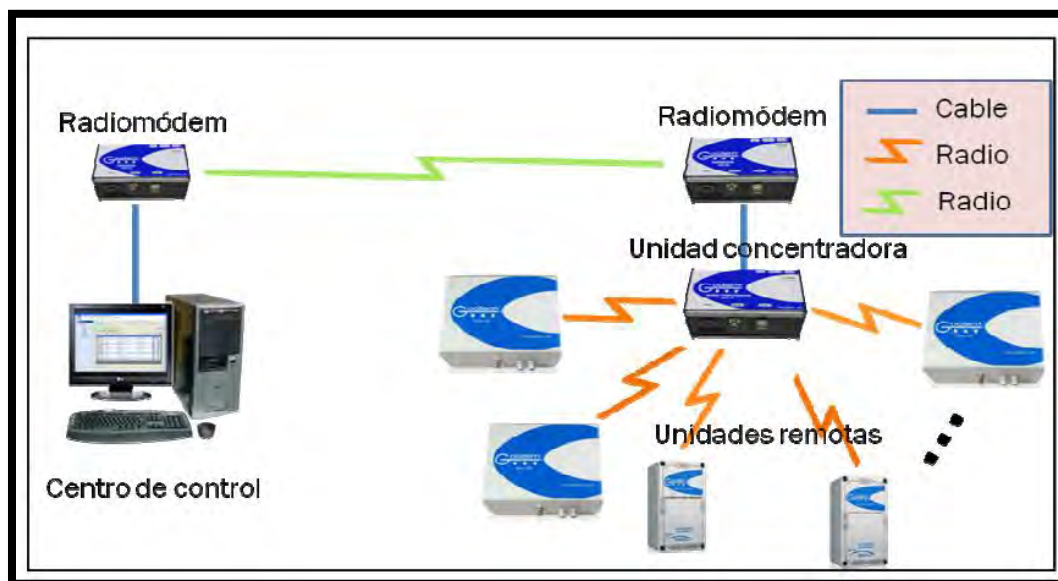


Figura 67. Representación del Radiomódem

Tanto si las distancias son superiores a 20 km o 25km como si hay necesidad de comunicar muchos concentradores, se pueden usar más radiomódems para poder llegar a cualquier punto o para lograr controlar todos los sectores.

3.1.7.4 *Ventajas de instalación*

Una de las ventajas importantes de este sistema es la modularidad, es decir, que no es necesario instalarlo todo de una vez. Hay muchas posibilidades de realizar gradualmente una instalación, lo que permite en muchos casos respetar parte de la instalación anterior, de modo que la comunidad pueda ahorrarse una gran inversión inicial y le permita progresivamente instalar todo lo que necesite.

Algunos ejemplos reales de modularidad han sido:

- En caso de existir algún sistema de automatización ya instalado pero que no funcione correctamente, si no se desea sustituir todo lo anterior por la solución Gootem GR, se puede empezar instalando el centro de control y unidades remotas nuevas a medida que se vayan estropeando las unidades o programadores del sistema anterior, aunque el control lo siga llevando la antigua instalación, de modo que poco a poco se cambie toda la instalación anterior por una Gootem GR y al final lleve el control total del sistema.
- Otra posibilidad es que de una finca sólo se controlen algunos sectores, o algunas válvulas y no toda entera. En este caso se puede instalar una unidad remota GR adaptada para cada hidrante. Si en un

futuro se desea ampliar la finca y se desean gestionar más válvulas, Gootem facilita unos módulos para ello. Las unidades remotas Gootem son ampliables. Se pueden ir añadiendo tarjetas de 2 o 4 salidas que permite conectar un total de 14 electroválvulas a cada unidad, de modo que cuando se necesite controlar más electroválvulas simplemente se han de conectar estos módulos a la unidad remota GR para que los reconozca automáticamente y pueda empezar a funcionar.

En ambos casos lo que se pretende es dar confianza al cliente en nuestro producto sin que le suponga una gran inversión.

3.1.8 Algunos trabajos realizados

Comunidad de regantes de casinos

Trabajos realizados: Automatización hidrantes y cabezales de riego vía radio

Constructora: OCIDE

Promotor – Propiedad: COMUNIDAD DE REGANTES DE CASINOS SEIASA MESETA SUR

Fecha: 2005

Descripción general

Tabla 24. Automatización vía radio de una obra de riego por goteo.

Zona	Superficie (ha)	Hidrantes Multiusuarios	Válvulas	Trasdutor
Sector A	345	22	34	22
Sector B	250	10	19	10
Sector D	304	16	28	16
Sector E	220	12	16	12
Sector F	55	5	8	5
Sector G	260	12	60	12
Sector H	270	15	27	15
Sector I	381	12	23	13

- Un centro de control instalado en las oficinas centrales de la comunidad de regantes de Casinos (Valencia).
- Controla el tiempo real de la presión en hidrantes
- Ocho cabezales de filtrado para las zonas de riego.
- Gestión de todos los hidrantes de riego vía radio.



Figura 68. Sistema de automatización completo con comunicación vía radio.

3.2 Selección de parcelas piloto para validar el funcionamiento del hidrante

Descripción de los posibles sitios para la instalación del hidrante para entrega automática de agua

3.2.1 Sitio 1. Guasave

Canal elevado de conducción principal, aproximadamente 1.5 m de carga, entre el espejo del agua y la zona de riego.

La derivación del canal principal hacia la zona de riego, es mediante una válvula de compuerta deslizante, como se muestra en la figura descarga libre en tubería de fono de 10 "

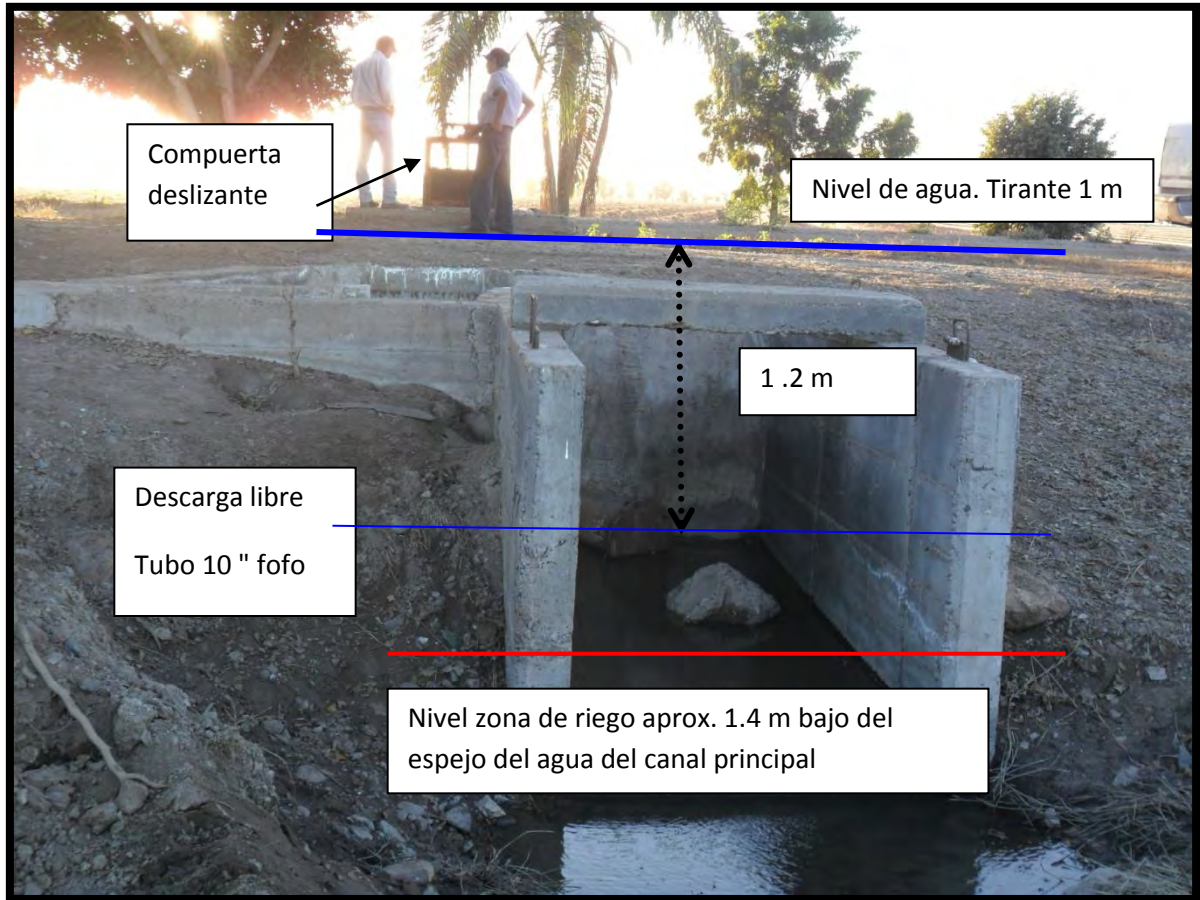


Figura 69. Derivación del canal principal hacia la zona de riego

La figura muestra la derivación del agua del canal principal hacia la zona de riego, después de pasar la compuerta deslizante.

Al frente se observa la zona de riego, una T con dos valvulas mariposa en tuberias de PVC de 8" hacia cada lado, aproximadamente 100 m

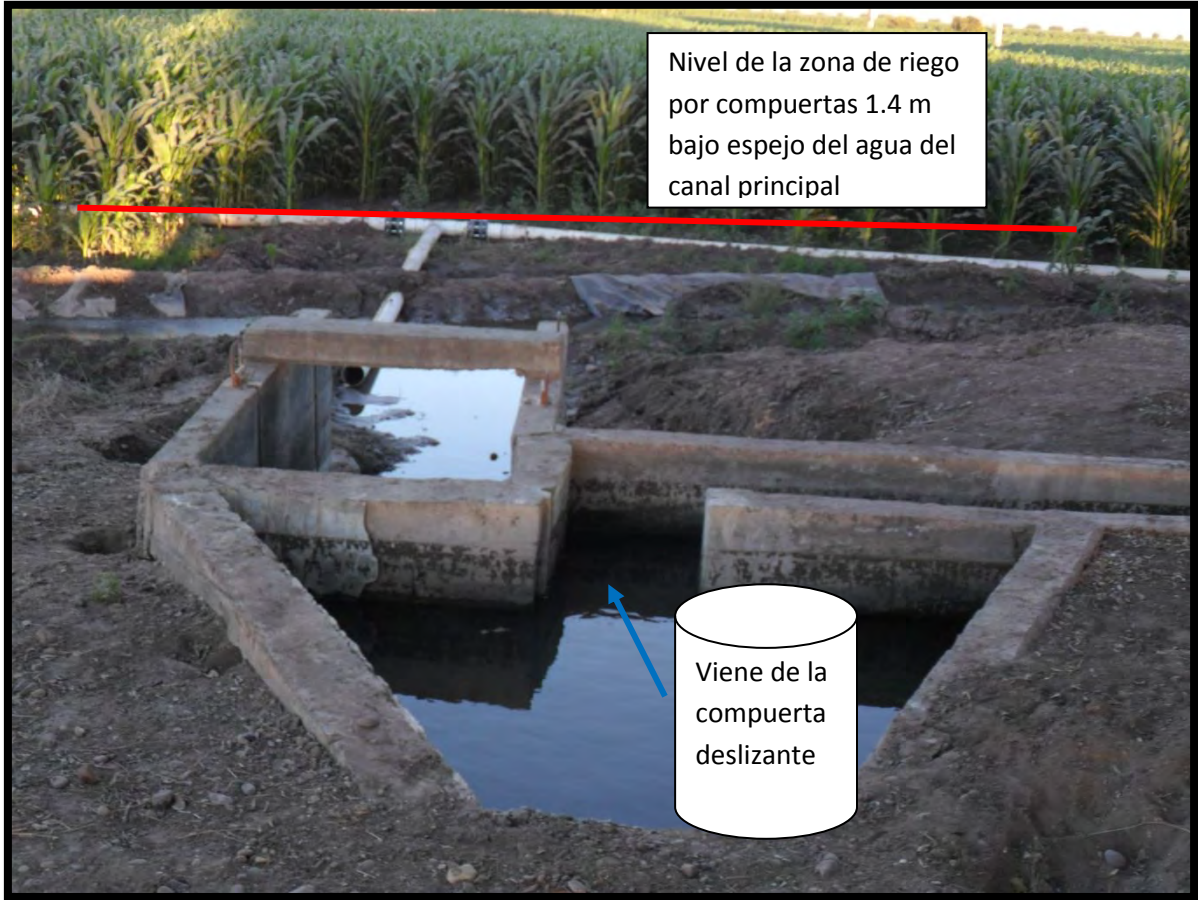


Figura 70. Puerta deslizante en la zona de riego

Resumen: Sitio sin ninguna instalación, el riego es por derivación, no hay válvulas ni sistemas de inyección, el agua se toma directamente del canal de conducción principal

3.2.2 Sitio 2. Km 2 Canal Lousiana

Cultivo de papa. La figura 71 muestra el canal principal Taxtes elevado, de ahí se deriva mediante una compuerta deslizante hasta un tanque de almacenamiento a orillas de la parcela. Tiene un desnivel aproximado de 2 m, y un volumen de entrega de 60 lps

Productor: Adolfo Murrieta Valdez



Figura 71. Canal principal Taxtes

La figura muestra la descarga del agua del canal principal. En este depósito el agua se toma para, mediante un sistema de bombeo centrifuga horizontal enviar al pivote central. Superficie aproximada 12 has



Figura 72. Depósito de agua

Hacia el sistema. La figura muestra la tubería después del bombeo que conduce el agua hacia la zona de riego, específicamente al pivote central. El sistema de bombeo centrifuga horizontal operado a base de electricidad 220 v

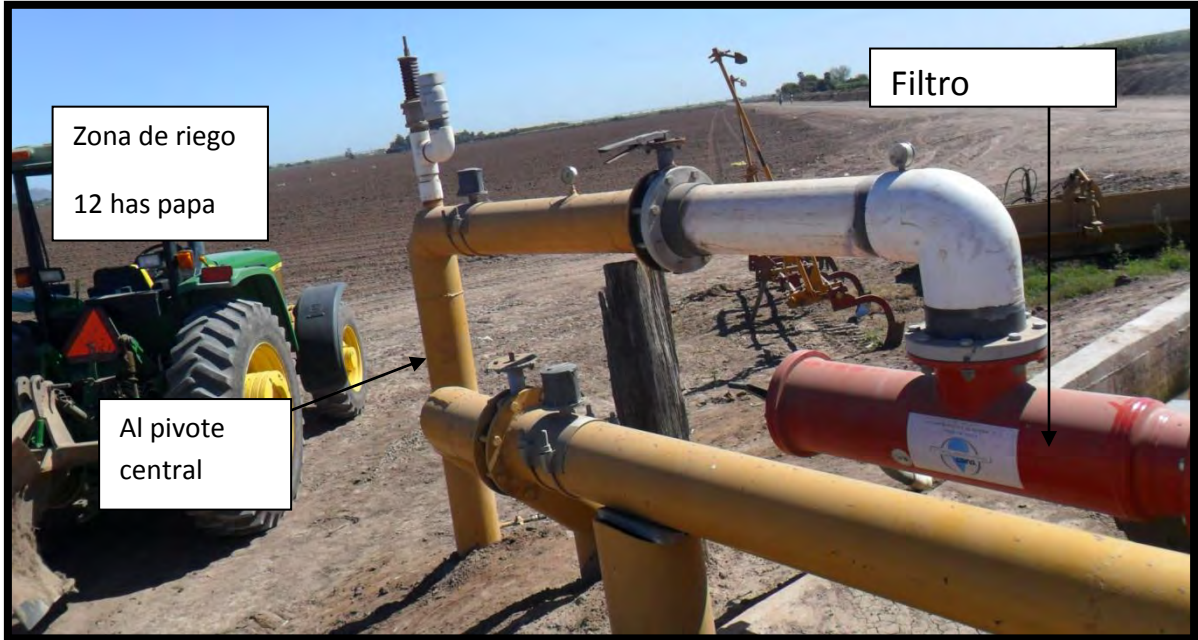


Figura 73. Tubería de conducción

La figura muestra la llegada de la tubería para alimentar al pivote central. Teóricamente en terreno plano, el desnivel es mínimo, debido al sistema de bombeo, puede ser irrelevante.



Figura 74. Alimentación pivote central

Resumen: El agua llega por gravedad a un depósito, de ahí se bombea al pivote central, la tubería es de 6" con una válvula de mariposa de 6" de tipo manual. Medición de caudal con un medidor de propela o totalizador. La bomba

eléctrica se anexa placa técnica. La corriente es alterna de 220 V con transformador y a pie de bomba.



Figura 75. Placa técnica de bomba

No se observa sistema de inyección y si se hiciera sería en el depósito. El terreno es plano y se cultiva papa por Pivote central y micro aspersión en las orillas.

3.2.3 Sitio 3. Canal Taxtes 9+500

Agrícola Reyes

Derivación del canal principal hacia la propiedad. Donde realiza el bombeo a 13 has de goteo



Figura 76. Canal principal Taxtes



Figura 77. Cabezal de bombeo

Resumen: El agua se deriva del canal principal mediante compuerta manual deslizante y llega al depósito en esta propiedad. Actualmente cuenta con tubería de PVC de 8" se bombea mediante centrifuga vertical de 2", se ignora la potencia, pero se supone suficiente para regar 12 has de goteo en cultivo de frijol a campo abierto, Tiene sistema de filtración de arenas y mallas y el retrolavado y válvulas en general son manuales.

3.2.4 Sitio 4. Cerillos derivación Pico de Pato

Sistema de riego pivote central. Se toma del canal principal, mediante una toma granja, compuerta deslizante y de ahí a aproximadamente 60 m se conduce en canal de tierra. La idea sería conducir este tramo en tubería a presión



Figura 78. Compuerta deslizante en canal principal



Figura 79. Canal de riego

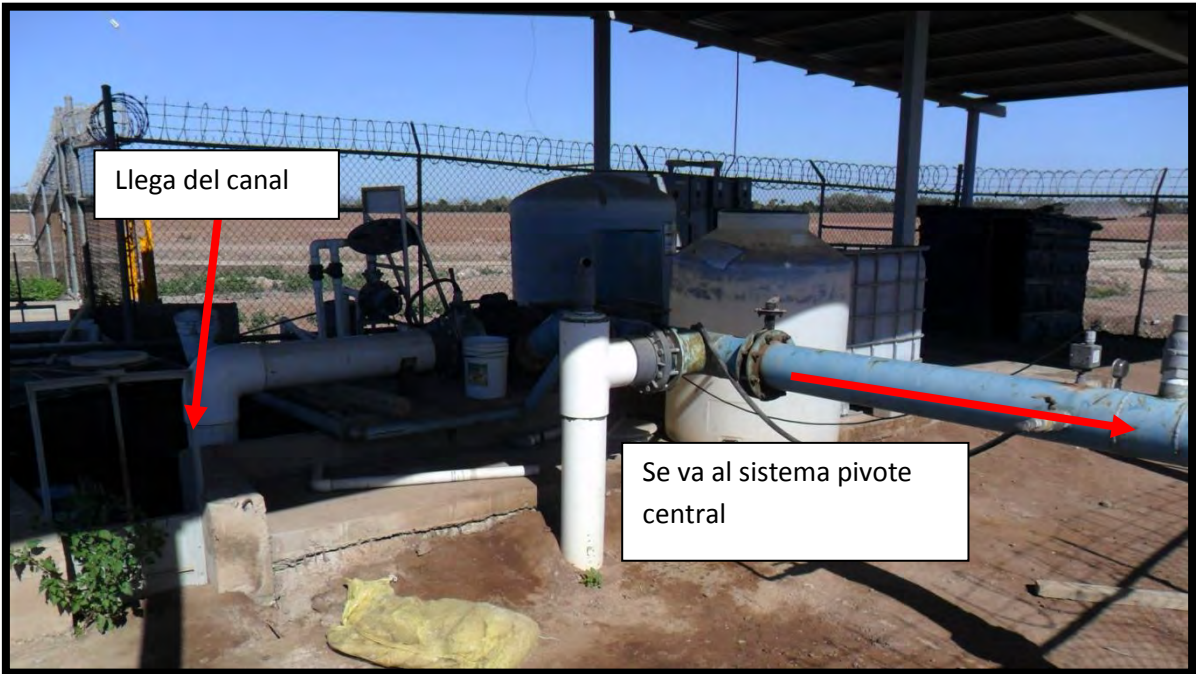


Figura 80. Depósito de agua



Figura 81. La zona de riego, 60 has de frijol por pivote central

Resumen: De forma similar, la derivación es manual hasta el depósito 30 m después de la válvula. Para llevarlo al pivote, se usa un sistema de bombeo eléctrico a 220 v, con un tablero eléctrico pero manual, la apertura y cierre es manual. Tiene sistema de inyección manual mediante un "by pass" o circuito en U. La tubería es de PVC de 8".

3.2.5 Sitio 5. Tetameche



Figura 82. Toma de agua del fin de canal, y llevada a un estanque para su bombeo.



Figura 83. Sistema de bombeo turbina vertical

El agua es bombeada aproximadamente 300 m entubada, y descargaba libre para el riego inundado. Ahora se conecta directamente a un cabezal de filtración para sistema de riego por goteo



Figura 84. Tubería de conducción

Actualmente se tiene este cabezal donde se inyecta la solución nutritiva, sistema de medición de caudal a propela o mecánico, y sus sistemas de medición de presión manométrica

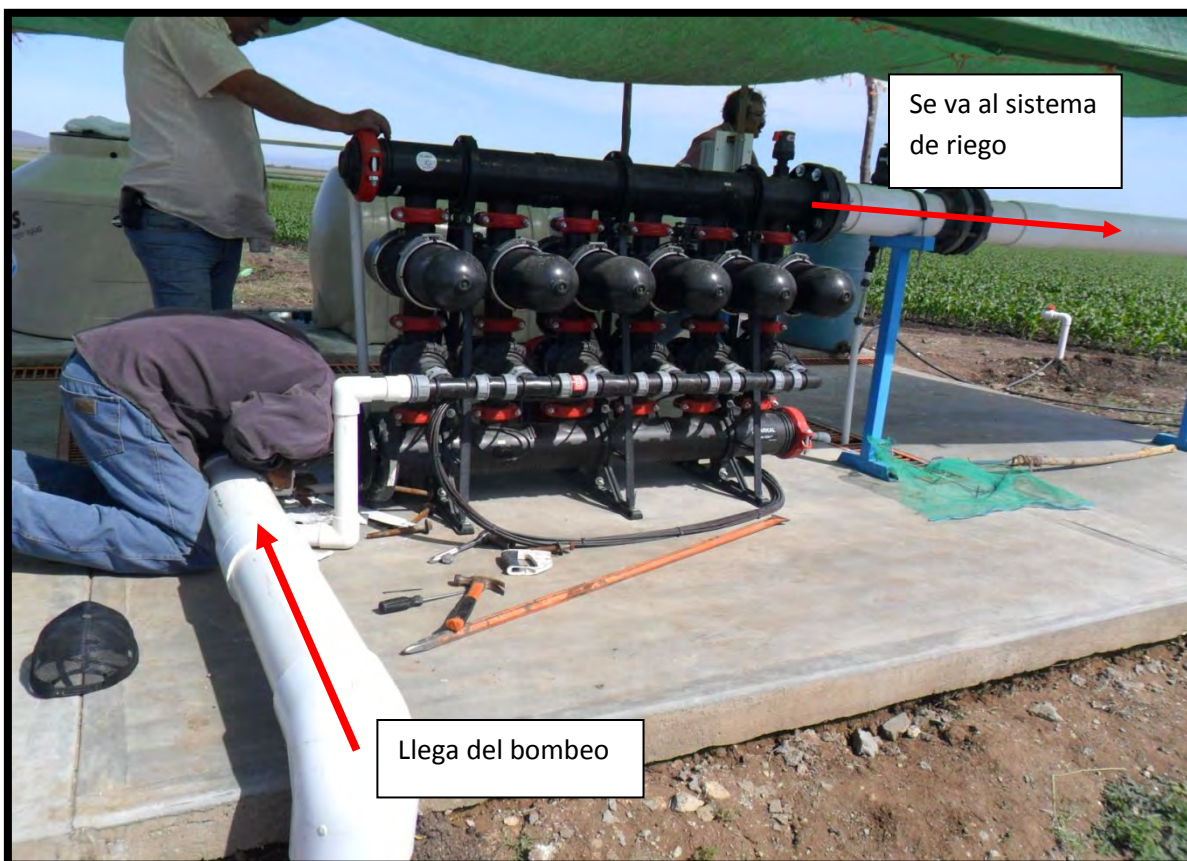


Figura 85. Sistema de inyección



Figura 86. Sistema de riego por goteo en maíz, aproximadamente 30 has.

Resumen: Todo el sistema opera de manera manual. Se toma el agua del final de canal. De ahí se conduce a un estanque donde se bombea con la turbina vertical en una tubería de 10" aproximadamente 300 m de terreno plano. En la descarga ahora se conecta una T para meterlo al sistema de bombeo, previo sistema de filtración por mallas, medidor de propela, válvula de mariposa de 6" así como la tubería al sistema, de la cual se va seccionando para el riego por goteo

Todos los pueden ser encuadrados en la siguiente imagen, Mochis, Cerillos, Guasave

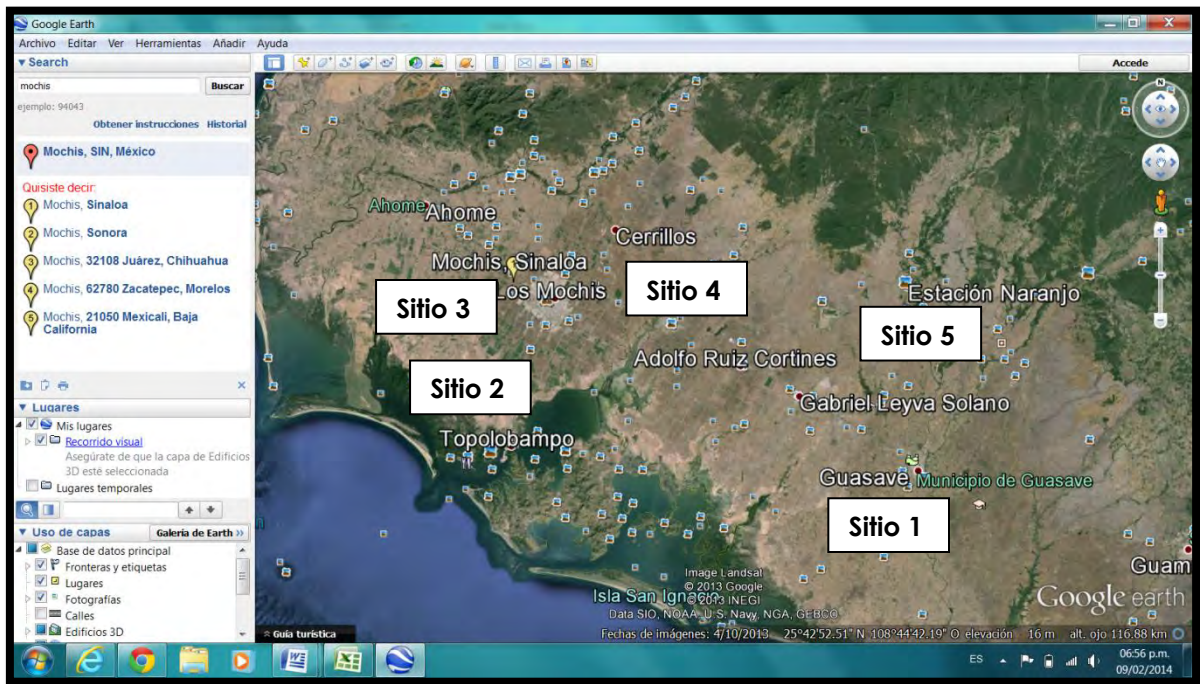


Figura 87. Mapa de sitios de las parcelas piloto para probar el hidrante

CONCLUSIONES

Los avances tecnológicos permiten hacer eficiente el tiempo en temidos de cálculo; actividades cotidianas han sido programadas y en consecuencia se han ido eliminando errores en la ejecución y seguimiento.

Aun cuando los conceptos han sido definidos desde hace un siglo, tecnológicamente sí que está ocurriendo un desarrollo importante en temas de interés hidroagrícola.

En este proyecto se han abordado tres temas prácticos para el uso eficiente del agua a nivel parcela; la discriminación y selección del programa de diseño del sistema de riego; una aplicación para llevar a cabo la calendarización del riego de forma remota, y el seguimiento en la entrega volumétrica de agua para riego. Desde el punto de vista del diseño del riego; si existe diferencia en el desarrollo dependiendo del tipo de programa informático que se use. Derivado del análisis realizado, el programa que más se adapta a las condiciones del riego presurizado en México, es el IRRICAD, cuenta con mayores funciones de diseño de sistemas. El programa genera advertencias cuando se exceden los rangos o valoraciones sobre las especificaciones de diseño. La base de datos puede incorporar cualquier marca o modelo de producto de riego. Además de que sus desarrolladores mantienen apoyo técnico permanente para los usuarios.

La aplicación para la calendarización del riego, depende de la información de las estaciones meteorológicas principalmente, si esto sucede, será posible llevar a cabo el ajuste temporal del calendario de riego, de manera constante atendiendo las variaciones puntuales en la parcela; esto puede hacerse directamente en la parcela.

El uso del dispositivo de entrega volumétrica, en las experiencias de comunidades de regantes, en España principalmente, es un sistema que funciona con éxito. En sistemas de riego a la demanda, la automatización de los dispositivos de entrega de agua, permite el control y seguimiento.

En México, una vez colocado y validado el dispositivo se estará en condiciones de emitir mayor información razonada de la aplicabilidad en los Distritos de riego del país, iniciando con las zonas productoras de maíz a nivel nacional que es el Estado de Sinaloa.

Con este proyecto se muestra la pertinencia del uso de sistemas automatizados a las actividades cotidianas aplicados a la ingeniería hidroagrícola bajo un esquema de sustentabilidad en el Agro Mexicano

BIBLIOGRAFÍA

- Arviza, J., Santamarina, C. 1995. *Ingeniería Rural: Hidráulica*. Valencia, España.
- Bertoa, M. F., Vallecillo, A. 2006. *Medidas de Usabilidad de Componentes Software*. Revista del IEEE América Latina, vol. 4, No.2, pp. 136-143, Abril 2006. Málaga, España.
- Bonilla, T., Mestries, F. 2010 *Crisis de sustentabilidad de la agricultura de riego en el valle central de Puebla*. Revista Estudios Agrarios, Vol. 16 Ene-Abril. UAM Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Sociología Rural, Azcapotzalco, Distrito Federal. México
- Buendía, E. J.C., Palacios, V. E., Chávez, M. J., Rojas, M. B. *Impacto del funcionamiento de los sistemas de riego presurizados en la productividad de ocho cultivos, en Guanajuato, México*. Agrociencia, vol. 38, núm. 5, septiembre-octubre 2004, pp. 477-486, Colegio de Postgraduados. México.
- CONAGUA. 2013. *Estadísticas del Agua en México*, Edición 2013. México, D.F.
- FAO. 2014. Base de datos AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Sitio web accedido el [18/08/2014 22:45] <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/?lang=es>
- González, D. H. 2001. *Las Métricas de Software y su Uso en la Región*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.
- IEEE. 1990. *Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, USA.
- IMTA. 2010. *Riego por aspersión y localizado*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México.
- Jiménez, C. B., Torregrosa, A. M. L., Aboites, A. L. 2010. "El agua en México: cauces y encauces". Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F.
- Lincoln Agritech Ltd. 2009. *IRRICAD User Guide*. Lincoln Ventures Ltd. Canterbury, New Zealand.
- ONGEI. 2004. *Guía Técnica sobre Evaluación de Software en la Administración Pública*. Versión 1. Oficina Nacional de Gobierno Electrónico e Informática. Lima, Perú.
- Pascual, B. 2008. "Riego de gravedad y a presión". Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España
- Quijada, U. M. G. 2008. *Retos sociales y productivos en la agricultura bajo riego de Guanajuato*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Rendón, P. L. *Tecnificación de los Distritos de Riego*. Claridades Agropecuarias, Vol. 90, Febrero 2001, Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. México, D.F
- Rivera H. R., Mujica, C. A. 2012. "DITMUSA" *Software para el diseño de sistemas de tuberías dotadas de múltiples salidas*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 21 pp. 63-68 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba.
- Scalone, F. 2006. *Estudio comparativo de los modelos y estándares de calidad del software*. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires, Argentina.
- SRH. 1976. "Política hidráulica en México: pasado, presente y futuro". Secretaria de Recursos Hidráulicos. México, D. F.
- UNAM. 2011. *Retos de la investigación del agua en México*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM. Cuernavaca, México.
- WCADI. 2012. *Manual de Usuario: versión 2012*. Weizman Irrigation LTD. México.
- Zapata, C. M., Gonzáles, C. G. 2009. *Revisión de la literatura en interoperabilidad entre sistemas heterogéneos de software*. Revista Ingeniería e Investigación, vol. 29, No.2, pp. 42-47, Agosto 2009. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

ANEXOS

ANEXO A: Artículos generados en el marco del proyecto

- a) 2014. Comparación de resultados experimentales de un Venturí con simulación de Dinámica de Fluidos Computacional. Congreso Nacional de Hidráulica.

Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de Dinámica de Fluidos Computacional

Comparison of Experimental Venturi-meter data with Computational Fluid Dynamic Simulations

Mauro Iñiguez Covarrubias¹, Jorge Flores Velazquez¹, Waldo Ojeda Bustamante¹,

Carlos Días Delgado², Roberto Mercado Escalante¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec Morelos, México, C.P. 62550, Fax (777) 319 4220, Correo electrónico: (mic_tlalte@hotmail.com), (wojeda@tlaloc.imta.mx). ²Centro interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México (cdiazd@uaemex.mx).

Resumen

1

En el diseño de sistemas de riego es necesario precisar la línea de energía total para evitar variaciones de presión y gasto en los puntos de entrega y control, estos puntos son idóneos hidráulicamente para instalar piezas especiales, entre los que se encuentran los aforadores Venturi, poco estudiados en relación a tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales. Las especificaciones de los Venturi son tomadas de particularidades y mediciones directas en laboratorio. Por lo tanto experimentar su funcionamiento teórico bajo criterios de simulación usando técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD), es una tarea para el especialista en irrigación. El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados obtenidos por simulación usando CFD con resultados experimentales del funcionamiento de un Venturi de características definidas reportadas en la bibliografía. Se validó el modelo implementado en CFD. Los valores reportados experimentalmente y los obtenidos mediante CFD, son prácticamente iguales, velocidad media (1.53 m s^{-1}), gasto ($0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y presión en el manómetro diferencial (15 cm de columna de mercurio Hg). Una vez validado el modelo, se ensayaron con CFD ocho casos más, con variación de gasto desde $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, resultado, se expone eliminar la incertidumbre del coeficiente de descarga manejado en el Venturi de laboratorio al simplificar la relación gasto ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)-pérdida de carga a una ecuación de potencia. Se anota que la carga hidráulica mínima de funcionamiento en la contracción del Venturi será con una presión mínima disponible de 0.4 kg cm^{-2} , se tiene una pérdida de carga total en la longitud de Venturi de 0.075 kg cm^{-2} para gasto máximo de $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para las condiciones expuestas es posible diseñar aforadores tipo Venturis con CFD para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales y contar con datos más confiables para su instalación en sistemas de riego.

Palabras clave: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), aforador Venturi, Sistemas de riego.

Abstrac

In the design of irrigation systems is necessary to specify the total energy line to avoid variations in pressure and flow at delivery and control points, these points are hydraulically suitable to install special equipment or devices, which include Venturi meters, little studied in relation to sizes, forms, operating conditions and

materials. It is important for irrigation designers to estimate Venturi-meter theoretical performance. Venturi-meter information were taken from laboratory measurements reported in literature to validate a Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The purpose of this work was to compare results obtained by CFD simulation versus experimental results of the operation of Venturi-meter features defined and reported in the literature. The validation results indicates that both values are similar, simulated with CFD and experimental, average velocity (1.53 m s^{-1}), flow ($0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and differential gauge pressure (15 cm column of mercury Hg). The validated CFD model was applied with eight cases with flow variations from $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ up to $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. As a result, a power equation is presented to eliminate the uncertainty of the discharge coefficient for the laboratory Venturi to simplify the relationship flow ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) – head loss. The minimum hydraulic working head in the contraction of the Venturi will be possible at a minimum pressure of 0.4 kg cm^{-2} . A total head loss of 0.04 kg cm^{-2} in the Venturi length was estimated for the maximum flow of $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Therefore, it is possible to design Venturi with CFD analyzing a diversity of sizes, forms, operating conditions and materials to generate data that are more reliable for Venturi-meters in irrigation systems.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Venturi-meters, Irrigation systems

Introducción

En obras estructuras hidráulicas tales como plantas de bombeo, plantas potabilizadoras, plantas de generación, micro centrales hidroeléctricas y sistemas de riego entre otras, en el diseño es necesario precisar la línea de energía total para evitar variaciones de presión y gasto en los puntos de entrega y control, estos puntos son idóneos hidráulicamente para instalar piezas especiales, entre los que se encuentran los aforadores Venturi, poco estudiados en relación a tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales.

Para el diseño de un aforador instalado en una tubería es necesario determinar en primer término el gasto por conducir (SARH, 1973), posteriormente al conocer las condiciones de

alojamiento se revisa las dimensiones del aforador, tipo de material, así como la velocidad interna, después se hace una revisión del diseño, para esto se utilizan los conocimientos de la mecánica de fluido (Levy, 1957, White, 1994).

Los criterios para determinar las pérdidas de carga, Chow, (1959) describe que por resultados experimentales se determina las normas para cada equipo hidráulico por utilizar. Se conoce la ecuación 1, ley de la conservación de energía, (White, 1994), ecuación base utilizada en el estudio de las piezas especiales como son los equipos de aforo Venturi.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_{f_{1-2}} \quad (1)$$

Dónde: v = velocidad del agua (m s⁻¹); g = Aceleración de la gravedad (m s⁻²); z = Carga de posición (m); $\sum_1^2 h_{f_{1-2}}$ = Pérdidas totales de energía entre 1 y 2 (m); $\frac{P_u}{\gamma}$ = Carga de presión (m),

$\frac{v_u^2}{2g}$ carga de velocidad (m) y γ peso específico del fluido (kg m⁻³). La ecuación es deducida en su

forma integral y es utilizada en la mayoría de aplicaciones para flujo con variables promedio tal como la velocidad media (ms⁻¹) en la sección considerada, la aplicación se halla en todo tipo de estructuras hidráulicas utilizadas en el campo de la ingeniería (SARH, 1973).

Medidores de presión diferencial también llamados Deprimógenos utilizan la presión diferencial del flujo y se usan como elementos primarios: tubos venturi, tubos pitot y placas de orificio., estos aparatos se utilizan en instalaciones con tuberías. Consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga piezométrica que frecuentemente se traduce en una pérdida de energía.

Estos aparatos que se utilizan como aforadores se instalan en tuberías, la zona de contracción consiste de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga de energía

que se traduce en una baja de la línea piezométrica, este cambio es medido por equipo especial, existen en el mercado diferentes equipos para medir este cambio diferencial de energía.

Los componentes del equipo aforador Tipo Venturi para su funcionamiento se puede dividir en cuatro zonas: a) **Zona de entrada;** Tiene como función favorecer una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, y con ello la velocidad de llegada a la zona de reducción; b) **Zona de contracción;** Parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de reducción de diámetro de entrada al diámetro menor por acción del estrangulamiento; c) **Zona de expansión;** Conformada por un tramo de transición del diámetro menor a el diámetro mayor igual al de entrada; d) **Zona de salida;** Constituida por un tramo recto sin cambio de diámetro y conduce hacia la tubería en uso.

Los componentes del aforado Tipo Venturi se diseñan para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales, la zona de contracción- expansión consta como su nombre lo dice de una contracción que puede ser curva o recta según el diseño propuesto, cada equipo propone el ángulo determinante en la longitud de la ampliación justo al final necesaria para normalizar el flujo. Una de las relaciones más determinantes en los venturis es el grado de estrangulamiento que relaciona las áreas de la sección contraída con el área de entrada, se escribe con la letra $m = A_2/A_1$. La medición de la pérdida de energía en el estrangulamiento, se recomienda realizarla en dos secciones, una justo al final de D_1 y la segunda en la contracción D_2 , justo después de la terminación de contracción e inicio de la ampliación (ASME, 1983). Para realizar la medición la pérdida de energía entre la dos secciones señaladas existen metodología de cálculo de acuerdo al equipo usado en el laboratorio, el más recomendable es el manómetro de diferencial de mercurio instalado en los puntos indicados cubriendo toda superficie de los dos círculos.

La ASME (1983) presenta una ecuación deducida de la ecuación 1 para la determinación del gasto es función de un coeficiente de descarga, con el conocimiento de la línea de distribución de presiones o línea piezométrica a partir del centro del tubo, si $h = (z_1 + v_1^2/2g) - (z_2 + v_2^2/2g)$ sustituyendo en la ecuación de continuidad $A_1 v_1 = A_2 v_2$, se obtiene la ecuación 2:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (2)$$

El coeficiente C_d es determinado con pruebas experimentales de laboratorio, Smetana (1957) reportado por Sotelo (1979) presenta dos tablas en la determinación del coeficiente, función del estrangulamiento $m = A_2/A_1$ y del número de Reynolds en la sección del estrangulamiento.

La ASME (1983) reporta diferentes tablas y figuras para tipos de aforadores Venturi, la IOS (1991) reporta la estandarización que se debe de cumplir en la medición en Venturis, Ranald (1978) muestra coeficientes muy similares a los presentados por la ASME, USDI (1979) reporta y generaliza las recomendaciones de IOS (1991), por su parte Sotelo (1979) muestra un ejemplo con tablas de C_d basado en el estudio de laboratorio y representaciones un poco diferente a los reportados por IOS (1991).

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta numérica que permite la visualización espacial del fenómeno de estudio, al obtener una solución numérica a los problemas de movimiento de fluidos, con un alto grado de precisión entre el modelo planteado y los datos experimentales, lo que ha permitido una mejor comprensión de los fenómenos hidráulicos y de mecánica en general. Así por ejemplo, en ingeniería hidráulica se ha hecho investigación en el análisis de Válvulas (Davis, *et al.*, 2002), bombas (Zhen, 2000) o en la aplicación de canales abiertos (Wu, *et al.*, 2000).

En Agricultura protegida, CFD ha sido una técnica usada para modelar el ambiente del invernadero y con ello plantear estrategias para la gestión del clima en invernaderos, mediante sistemas auxiliares de refrigeración o calefacción (Flores-Velazquez, *et al.*, 2011, 2014). En sistemas de riego presurizado es posible encontrar aplicaciones para el análisis de emisores de riego (Palau, *et al.*, 2004) y dispositivos de inyección de fertilizantes (Manzano *et al.*, 2005).

Debido a la complejidad del fenómeno ha sido necesarios discretizar el sistema y dejar fijas ciertas características del fluido, con lo cual aplicando las ecuaciones generales de balance de masa, momento y energía en una sustancia finita del flujo era posible plantear una ecuación que describe el movimiento de este, sin embargo, en la mayoría de los casos esta descripción era puntual y no era posible una representación espacial del sistema, lo que ha venido a resolver la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), (Anderson, *et al.*, 1983).

El planteamiento de la dinámica de fluidos computacional, se fundamenta en la solución de las ecuaciones que define el movimiento de un fluido, combinando la Dinámica de fluidos, la programación y los métodos numéricos. En general el movimiento de un fluido está basado principalmente en procesos físicos, que pueden ser planteados en términos matemáticos como una serie de ecuaciones en derivadas parciales para representar numéricamente el flujo. Si se considera un fluido incompresible (agua) dentro del dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ durante un intervalo de tiempo $[0, t]$, la dinámica del flujo en cada punto (x, y) en un instante específico t está determinado por las variables de estado, densidad de masa $\rho(x, t)$, el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$. El planteamiento diferencial se deriva de la aplicación de los principios de conservación de masa, momento y energía sobre un volumen de control, características incluidas en las ecuaciones de Navier-Stokes(N-S); a partir del cual es deducida en su forma diferencial, que en una forma generalizada, puede ser expresada como la ecuación 3 (White, 1994).

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (3)$$

La ecuación 3 contiene los cuatro términos que definen la dinámica del fluido: Inestabilidad, Convección, Difusión y Término fuente, la variable ϕ es una forma de variable dependiente, pudiendo ser masa (kg), velocidad (m s⁻¹), temperatura (K), etc. y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico, en un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$, ρ es la densidad (kg m⁻³), t es el tiempo (s), ∇ denota el operador nabla, u la velocidad del fluido (m s⁻¹), Γ coeficiente de difusión (m² s⁻¹), y S el término fuente (o sumidero).

En este trabajo se aporta información sobre el funcionamiento de un Venturi bajo criterios de ecuaciones deducidas en forma diferencial e integral, partiendo de un equipo Venturi con características definidas y datos experimentales obtenidos en laboratorio reportado en la bibliografía. El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados obtenidos por simulación usando CFD con resultados experimentales del funcionamiento de un Venturi de características definidas reportadas en la bibliografía, los resultados obtenidos son base del prototipo recomendable a instalarse en sistemas de riego.

MATERIALES Y METODOS

Venturi de estudio: El Venturímetro obtenido por Sotelo-Ávila (1979) es de un estudio reportado por Smetana (1957), figura 1, tiene un diámetro en la zona inicial de $D_1 = 0.15$ m y un diámetro en la zona de estrangulamiento de $D_2 = 0.075$ m, la transición entre diámetros en la zona de contracción es de forma cónica, la zona de expansión consta de una ampliación que va desde el final de la zona de contracción nuevamente al diámetro D_1 , el estudio propone un ángulo de de 2.5° a 7° determinante para la longitud de la ampliación de salida, longitud necesaria para normalizar el flujo, el dato en la

deflexión del manómetro es de $\Delta h = 15$ cm de columna de mercurio, tal como se muestra en la figura 1, peso específico del mercurio igual a $\gamma_m = 13\,595$ kg/m³ y la viscosidad cinemática del agua a 10^o C es igual a $\nu = 0.013$ cm² seg⁻¹.

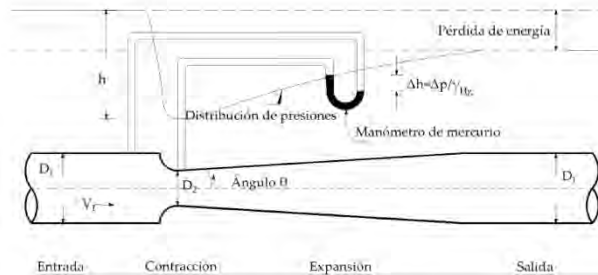


Figura 1. Venturímetro en una tubería.

Las principales variables que se estudian en este trabajo y que afectan al aforador Venturi son las corrientes cinéticas. Estas pueden ser debido al diseño impropio de la zona de entrada o de salida (velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias).

La relación $m = A_2/A_1$ se le llama grado de estrangulamiento y es uno de los parámetros básicos en la revisión del funcionamiento hidráulico del aforador. Con el conocimiento de la línea de distribución de presiones o línea piezométrica donde $h = (z_1 + v_1^2/2g) - (z_2 + v_2^2/2g)$ y de la ecuación de continuidad $A_1 v_1 = A_2 v_2$, sustituyendo en la ecuación 1 y en términos de la deflexión en el manómetro de mercurio, y al corregir los errores cometidos al no considerar las pérdidas de carga y al considerar m como el grado de estrangulamiento se reporta la ecuación (4).

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (4)$$

Dónde: A_2 = Área de la sección contraída (m²); g = Aceleración de la gravedad (m s⁻²); γ_m = Peso específico del Mercurio (km m⁻³); γ = Peso específico del agua (km m⁻³); totales de energía (m); deflexión en el manómetro de mercurio Δh (m) y. C_d = Coeficiente de descarga (adimensional).

Estos aparatos que se utilizan como aforadores y se instalan en tuberías, la zona de contracción consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga de energía, que se traduce en una baja de la línea piezométrica, este cambio es medido por equipo especial, existen en el mercado diferentes equipos para medir este cambio. Para Webber (1971) el diámetro D_1 de la contracción debe ser lo suficientemente grande que la presión no caiga por debajo de 2 metros de columna de agua respecto de la presión absoluta, en esta presión hay tendencia que aparecen burbujas de aire existiendo la cavitación.

El Venturi mostrado en la Figura 1 es un manómetro de mercurio, muy utilizado en laboratorio y el gasto se puede determinar según la ecuación 5, Sotelo (1979).

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad (5)$$

En el cuadro 1 se indican las características geométricas del aforador reportado por Sotelo (1983) de acuerdo a Smetana (1957), la longitud de la entrada y salida es igual a $4D_1$.

Cuadro 1. Características geométricas del Venturi experimental.

Diámetro (m)		Relación		Área (m ²)		Relación		Contracción		Longitud(m)
Entrada= D_1	Estrangulamiento = D_2	D_2/D_1	A_1	A_2	Áreas= m	Radio (m)	Ángulo (grados)	Expansión		
0.150	0.075	0.50	0.01767	0.0044	0.25	0.0375	3.5	0.6131		

El resultado buscado con los resultados experimentales del funcionamiento de un Venturi de características señaladas y reportadas en la bibliografía es calcular el gasto. La velocidad de inicio es $V_i = 1.533 \text{ m s}^{-1}$, proponiendo como límites de estrangulamiento $m=0.25$ y con números de Reynolds para este estudio mayores de 10^5 Sotelo (1971). En la instalación de los aforadores Venturi

en sistemas para riego, los puntos importantes que se deben de conocer son: la pérdida de energía total en el equipo y la presión absoluta en la contracción, se recomienda realizar la medición desde 4D₁ antes de la contracción hasta 4D₂ después de la ampliación, justo cuando el flujo se comporte como un fluido totalmente desarrollado, Webber (1971).

Dinámica de fluidos computacional (CFD): Para este procedimiento se utilizó el programa comercial ANSYS, Workbench, V 14.5. Este programa contiene interfaces para la generación de la geometría (design model), el mallado (meshing) y las simulaciones (Fluent). En general CFD utiliza una serie de pasos que pueden englobarse en tres grandes grupos, i) preproceso.- A partir del modelo físico del Venturi se genera la geometría del dispositivo, los datos para realizar el dibujo son los reportados en la tabla 1, (Figura 2A), en este caso fue creado en forma 3-Dimensional para mejor representación de los flujos. Un paso que es básico para el análisis es el mallado (Figura 2B), en el cual el dominio computacional es subdividido en número finito de elementos prismáticos donde las ecuaciones de conservación fueron aplicadas. ii) Proceso.- Una vez generada la geometría, se importa al procesador donde se le adjudicación de valores a las características de frontera (Figura 2C), entrada lado izquierdo y salida lado derecho, de igual manera, se establecen las hipótesis correspondientes respecto al solver a utilizar para conseguir la solución, como se indica en el Cuadro 2, y por último el inciso iii) Posproceso, los resultados se muestran de manera gráfica y escalar.

Cuadro 2. Condiciones de inicio e hipótesis de cálculo

Hipótesis de simulación	
Solver	Pressure-Based, Segregado
Formulación	Implícita
Condición de tiempo	Estacionario
Modelo de Turbulencia	K- ω de dos ecuaciones
Escenarios de simulación	
Velocidad del fluido	Constante (velocidad)
Escenarios de simulación	I.

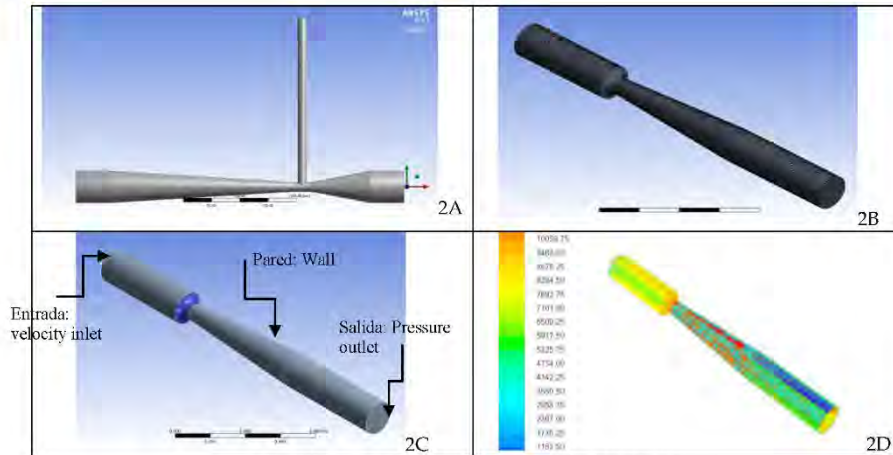


Figura 2. Construcción del modelo computacional por etapas

Resultados y discusión

Método de revisión para el Venturi probado en Laboratorio: Se utiliza la metodología propuesta por Sotelo (1983), el dato de entrada es la velocidad de inicio es $v_1 = 1.533 \text{ m s}^{-1}$. Primero se determina el coeficiente de descarga C_d (figura 3), al relacionarlo con grado de estrangulamiento $m=0.25$ (dato, tabla 1), se obtiene $C_d=1.009$, la altura de columna de mercurio en la deflexión del manómetro, es dato, igual a $\Delta h = 15 \text{ cm}$, con la ecuación 5 se determina el gasto $Q=0.02698 \text{ m}^3/\text{s}$, por continuidad se determina la velocidad en la contracción $v_2=6.13 \text{ m}^3/\text{s}$, con la ecuación del número de Reynolds $Re = \frac{D_2 v_2}{\nu}$, se obtiene $Re=3.54 \cdot 10^5$, lo cual es mayor a 10^5 y así termina el cálculo del gasto. La figura 3 reemplaza a las reportadas por Smetana en función de mostrar una ecuación de relación estrangulamiento-coeficiente de descarga con R^2 igual 0.9972.



Figura 3. Coeficiente C_d en relación al grado de estrangulamiento m .

Al examinar los resultados con este procedimiento se observa que al realizar cualquier cambio de velocidad inicial es necesario conocer el cambio de altura de la columna en el manómetro de mercurio para así conocer el gasto con esas nuevas condiciones. Esto es, el gasto está relacionado con la altura de la columna en el manómetro de mercurio, lo que conduce a una sola ecuación con dos incógnitas. Con esta metodología de cálculo, como se ha dicho, para un venturi con medidas determinadas es necesario conocer la velocidad inicial, la altura en el manómetro diferencial de mercurio, m grado de estrangulamiento y así determinar de forma gráfica el coeficiente C_d y hasta la utilización de la ecuación de gasto. Con este procedimiento no es posible realizar para algún cambio la comprobación teórica o visual con base en la herramienta mostrada, es necesario herramientas no convencionales, tarea pendiente para el ingeniero especialista en irrigación.

Método de revisión para el Venturi con CFD: El inicio de mostrar los resultados es con la velocidad en la zona de entrada (con D_1). los datos resultantes en CFD de la velocidad en cada punto y en cada sección son vectores, valores puntuales, Figura 4. En la Figura 5 de acuerdo al diámetro (de izquierda a derecha, zona de entrada) se anota el valor resultante de vector velocidad, los valores resultantes tienen un valor igual a 0.0 ms^{-1} en la pared del tubo y un máximo de 1.8 ms^{-1}

en el centro de tubo. Con estos valores del vector, esto es, en forma de círculos, se determina la velocidad media con la ecuación 5, se realiza el mismo procedimiento para la zona de contracción y para la zona de salida, el valor medio resultante se reporta en el Cuadro 3.

$$V_m = \frac{V_1 A_1 + V_2 A_2 + \dots + V_n A_n}{A_{total}} \quad (5)$$

En donde: V_m = velocidad media, V_n = velocidad en el círculo 1 hasta n, A_n = Área en el círculo 1 hasta n, A_{total} = Área total del tubo.

Para la presión los resultados son también vectores, igual en cada sección son valores puntuales no son medios, en la Figura 5 son los resultados en la zona de entrada, de acuerdo a cada longitud del diámetro (de izquierda a derecha), los valores resultantes tienen un valor en la pared del tubo igual a 78.7 cm de columna de mercurio a 78.4 cm en el centro de tubo, los resultados del CFD están en unidades de pascales y se cambian para presentarlos en altura de columna de mercurio. Con estos valores del vector, esto es, en forma de círculos, se determina la presión media con la ecuación 6, se realiza el mismo procedimiento para la zona de contracción y para la zona de salida, el valor medio resultante se reporta en el Cuadro 3, los resultados de la presión se presentan en unidades de pascales, cm de columna de Hg y en kg cm⁻².

$$P_m = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + \dots + P_n A_n}{A_{total}} \quad (6)$$

En donde: P_m = presión media, P_n = presión en el círculo desde 1 hasta n, A_n = Área en el círculo desde 1 hasta n, A_{total} = Área total del tubo.

En la figura 4 se muestra los vectores resultados de velocidad para la zona de entrada, zona de contracción, ampliación y por último la zona en donde el flujo es totalmente desarrollado llamada Zona de salida.

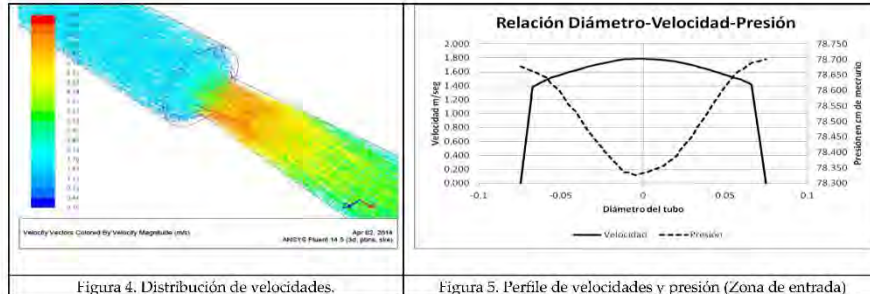


Figura 4. Distribución de velocidades.

Figura 5. Perfil de velocidades y presión (Zona de entrada)

Al comparar los valores reportados experimentalmente por Sotelo (1979) y los obtenidos mediante CDF (Cuadro 3), son prácticamente iguales, velocidad media, zona de entrada (1.53 m s^{-1}), gasto ($0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (por continuidad)) y presión en el manómetro diferencial, 15 cm de columna de mercurio Hg (diferencia de presión en cm de Hg entre la zona de entrada a la zona de contracción).

Cuadro 3. Resultados de la versión del caso experimental

Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
Presión		Vel. media		Presión		Vel. media		Presión		Vel. media	
Pascal	cm de Hg	Kg/cm ²	ms ⁻¹	Pascal	cm de Hg	Kg/cm ²	ms ⁻¹	Pascal	cm de Hg	Kg/cm ²	ms ⁻¹
104658	78.5	1.07	1.55	86639	65	0.88	5.55	101326	76	1.033	1.52

Una vez validado el modelo, se ensayaron con CFD ocho casos más, con velocidades medias desde 0.028 m/s hasta 2.264 m/s , variación de gasto desde $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, esto es, se cumple continuidad. En el Cuadro 4 se reportan los resultados de los ocho casos más (versiones 2 a la 9), la presión en unidades de pascales, cm de columna de Hg y en kg cm^{-2} , la velocidad media en la zona de entrada, zona de contracción y zona de salida en ms^{-1} . Para la determinación de los valores medios se usó el procedimiento para la utilizaron también de las ecuaciones 5 y 6.

Cuadro 4. Resultados de las ocho versiones con CFD

Versión	Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
	Pascales	Presión cm de mercurio	Kg/cm ²	Velocidad Media ms ⁻¹	Pascales	Presión cm de mercurio	Kg/cm ²	Velocidad Media ms ⁻¹	Pascales	Presión cm de mercurio	Kg/cm ²	Velocidad Media ms ⁻¹
V2	101478	76.1	1.04	0.285	100828	75.6	1.03	1.042	101325	76.0	1.033	0.258
V3	101829	76.4	1.04	0.577	99319	74.5	1.01	2.082	101323	76.0	1.033	0.569
V4	102419	76.8	1.04	0.866	96791	72.6	0.99	3.122	101322	76.0	1.033	0.867
V5	103223	77.4	1.05	1.140	93237	69.9	0.95	4.161	101327	76.0	1.033	1.126
V6	104206	78.2	1.06	1.424	88908	66.7	0.91	5.164	101321	76.0	1.033	1.454
V7	105397	79.1	1.08	1.725	82770	62.1	0.84	6.202	101326	76.0	1.033	1.690
V8	106740	80.1	1.09	1.993	76394	57.3	0.78	7.278	101320	76.0	1.033	2.045
V9	108301	81.2	1.10	2.268	69015	51.8	0.70	8.316	101319	76.0	1.033	2.234

Del análisis de resultados mostrados en el Cuadro 4, para el rango del gasto estudiado desde 0.005 m³/s hasta 0.040 m³/s se tiene la correspondencia perdida de carga en cm de columna de mercurio, (inicio-final de la sección contracción). Resultado, se expone eliminar la incertidumbre del coeficiente de descarga manejado en el Venturi de laboratorio al simplificar la relación gasto (m³ s⁻¹)-perdida de carga (Hg) a una ecuación de potencia, Figura 6. La forma de operación es sencilla y conduce a presentar así los resultados, una sola ecuación con una incógnitas. Por ejemplo utilizar la figura 6, manómetro diferencial de presión igual a 15 cm de columna de mercurio Hg, se obtiene un gasto de (0.027 m³ s⁻¹), y por continuidad se tiene la velocidad media, zona de entrada (1.53 m s⁻¹).

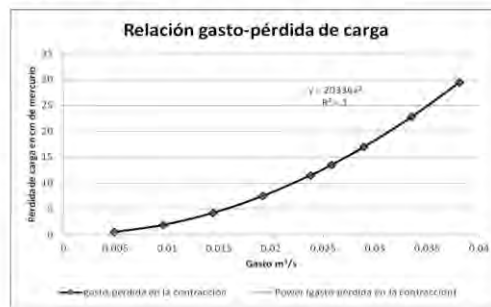


Figura 6. Determinación de las pérdidas sección contracción.

En otra parte de la discusión se muestra que presentar así un Venturi con la opción de datos de laboratorio no se puede determinar la pérdida de carga total entre las secciones zona inicial y zona final, en cambio con resultados presentados en el Cuadro 4 y los datos de la presión

en kg/cm^2 convertidos a centímetros de columna de agua, es una ecuación con una incógnita, esta relación se presenta en la Figura 7 para las condiciones de estudio presentadas. Así utilizando la Figura 7, para gasto máximo de $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se tiene la pérdida de carga total en la longitud de Venturi de 0.075 kg cm^{-2} , 75 cm de columna de agua o pérdida de energía total en el equipo. Se recomienda realizar la medición desde $4D_1$ antes de la contracción hasta $4D_1$ después de la ampliación hasta que su flujo se comporte como un fluido totalmente desarrollado.

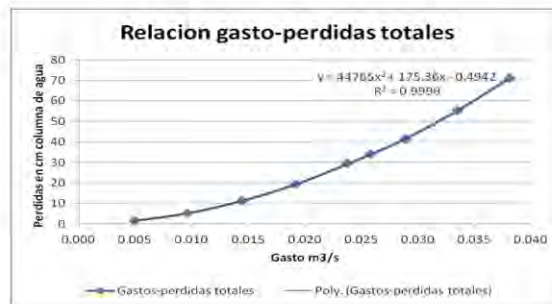


Figura 7. Determinación de las pérdidas sección inicial contra sección final

Se destacan otros 3 incisos de resultados, a) la carga hidráulica de funcionamiento en la contracción del Venturi será con una presión mínima disponible de 0.4 kg cm^{-2} para el gasto máximo de $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, así se cumple con la condición impuesta por Webber (1971) para la contracción, en donde la presión disponible de 0.4 kg cm^{-2} , es mayor de 0.2 kg cm^{-2} , condición impuesta para de evitar la cavitación, b) Por la condición anterior, el gasto límite superior para las dimensiones y condiciones de trabajo es precisamente el gasto de $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y c) la pérdida de carga total para la longitud de Venturi es de 0.075 kg cm^{-2} . Los resultados de estos incisos son un punto importante para aclarar que sólo con CFD se puede reconstruir los datos experimentales y en éste caso para el Venturi reportado por Smetana (1957).

Conclusiones

Se concluye que para las condiciones propuestas es posible ensayar diseños de Venturi bajo criterios de ecuaciones deducidas en su forma diferencial modelo simulado con la herramienta CFD y en su forma integral, funcionamiento hidráulico del Venturi de laboratorio. En la formulación integral el Venturi de laboratorio sólo se aplica para la condición presentadas, no es posible hacer interpolaciones para las condiciones iniciales o diferentes a las iniciales, siendo resuelto el análisis al aplicar la forma diferencial en estudio con CFD.

El conocimiento de las pérdidas de carga totales sólo se obtiene al realizar el ensayo con la ecuación de forma diferencial resuelta con planteamientos en CFD, conjuntamente simplificando la relación gasto-perdida de carga a una ecuación de potencia y eliminado la incertidumbre del coeficiente de descarga. Se concluye que para las condiciones expuestas es posible diseñar Venturis con CFD para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales y contar con más datos confiables para su instalación en sistemas de riego.

Referencias

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), *Fluid meters, their theory and application*, H.S. Bean, ed., Research Committee on fluid meters, sixth edition, New York, 1983
- ANDERSON, JR., J. D. *Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications*. Mc. Graw-Hill. USA. 1995, 328 p.
- CHOW, V. T., *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1959.
- DAVIES, J. A. Y STEWART, M. *Predicting globe control valve performance. Part I. CFD, modeling*. ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, 2002.
- FLORES-VELAZQUEZ, J. MEJIA, E. ROJANO, A Y MONTERO, J. I. *Análisis del clima en un invernadero con ventilación mecánica*, Agrociencia, 2011.

- HENDERSON, F. M., *Open Channel Flow*, Macmillan, Nueva York, 1966.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (IOS), *Measurement of flow by means of pressure differential devices*, ISO 5167-1, Geneva, Switzerland, 1991.
- LEVY, E., *Mecánica de los fluidos*, Instituto de ingeniería, México, UNAM, 1957, pp 266.
- MANZANO, J Y PALAU, G. *Hydraulic Modeling of Venturi injector by means of CFD*. ASAE International meeting. Tampa Florida, 2005.
- PALAU, G. ARVIZA, J. Y FRANKEL S. *Tree-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation*. 34TH aiaa Fluid Dynamics Conference and exhibit. IN AIAA-2004- Portland. USA, 2004.
- J. SMETANA, *Hidráulika*, Ccskoslovenka Akademic, VED, Praga, (1957), Referencia de SOTELO-ÁVILA, G. *Hidráulica general*, México D.F: Limusa, 1979, 277 pp.
- SOTELO-ÁVILA, G. *Hidráulica general*, México D.F: Limusa, 1979, 277 pp.
- RANALD, V. G. *Mecánica de fluidos e Hidráulica*, McGraw-Hill, segunda edición, México D.F. 1978
- SARH. *Proyecto de Zonas de Riego*, Dirección de Proyectos de Irrigación, Departamento de Canales, México. D. F. 1973, 567 pp.
- USDI (U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR), *Water Measurement Manual*, Bureau of reclamation Third edition, U.S. Govern printing office, Denver, 1979.
- WEBBER, N. B., *Fluid Mechanics for Civil Engineers*, Primera edición, Chapam and Hall, 1971, 330 pp.
- WHITE M., FRANK, *Fluid Mechanics*, Tercera edición, McGraw Hill, inc., 1994, 736 pp.
- WU, W., RODI, W Y WENKA, T. *3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 126 Num 1, (2000).
- ZHENG, G. *Applications of CFD tools to design and development of pumps*. *Turbomachinery*. Vol. 28, 11.649-656, 2000.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN VENTURI CON SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES

Íñiguez-Covarrubias Mauro¹, Flores-Velázquez Jorge¹, Ojeda-Bustamante Waldo¹,
Díaz-Delgado Carlos² y Mercado-Escalante José Roberto¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec Morelos,
México, C.P. 62550

²Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec
S/N, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, México. C.P. 50100

mic_talate@hotmail.com, jorge_flores@tlaloc.imta.mx, wojeda@tlaloc.imta.mx, cdiazd@uaemex.mx,
rmercado@tlaloc.imta.mx

Introducción

En el diseño y operación de estructuras hidráulicas tales como plantas de bombeo, plantas potabilizadoras, plantas de generación hidroeléctrica, micro centrales hidroeléctricas y sistemas de riego entre otras, es necesario precisar la línea de energía total para evitar variaciones de presión y gasto en los puntos de entrega y control, estos puntos son idóneos hidráulicamente para instalar piezas especiales, entre los que se encuentran los aforadores Venturi, poco estudiados en relación a tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales.

Para el diseño de un aforador instalado en una tubería es necesario determinar en primer término el gasto por conducir (SARH, 1973), posteriormente al conocer las condiciones de alojamiento se revisa las dimensiones del aforador, tipo de material, así como la velocidad interna, después se hace una revisión del diseño, para esto se utilizan los conocimientos de la mecánica de fluido (Levy, 1957, White, 1994).

Los criterios para determinar las pérdidas de carga, Chow, (1959) describe que por resultados experimentales se determina las normas para cada equipo hidráulico por utilizar.

Se conoce la ecuación 1 como la ley de la conservación de energía, (White, 1994), ecuación base utilizada en el estudio de las piezas especiales como son los equipos de aforo Venturi.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_{f_{1-2}} \quad (1)$$

Dónde: v = velocidad del agua, ($m\ s^{-1}$); g = Aceleración de la gravedad, ($m\ s^{-2}$); z = Carga de posición, (m); $\sum_1^2 h_{f_{1-2}}$ =

Pérdidas totales de energía entre la sección 1 y sección, 2 (m);

$\frac{p}{\gamma}$ = Carga de presión (m), $\frac{v^2}{2g}$ = carga de velocidad, (m) y γ

peso específico del fluido, ($kg\ m^{-3}$)

La ecuación es deducida en su forma integral y es utilizada en la mayoría de aplicaciones para flujo con variables promedio tal como la velocidad media ($m\ s^{-1}$) en la sección considerada, la aplicación se halla en todo tipo de estructuras hidráulicas utilizadas en el campo de la ingeniería (SARH, 1973).

Medidores de presión diferencial también llamados Deprimógenos utilizan la presión diferencial del flujo y se

usan como elementos primarios: tubos venturi, tubos pitot y placas de orificio, estos aparatos se utilizan en instalaciones con tuberías. Consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga piezométrica que frecuentemente se traduce en una pérdida de energía.

Estos aparatos que se utilizan como aforadores se instalan en tuberías, la zona de contracción consiste de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga de energía que se traduce en una baja de la línea piezométrica, este cambio es medido por equipo especial, existen en el mercado diferentes equipos para medir este cambio diferencial de energía

Los componentes del equipo aforador Tipo Venturi para su funcionamiento se puede dividir en cuatro zonas: a) *Zona de entrada*: Tiene como función favorecer una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, y con ello la velocidad de llegada a la zona de reducción; b) *Zona de contracción*: Parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de reducción de diámetro de entrada al diámetro menor por acción del estrangulamiento; c) *Zona de expansión*: Conformada por un tramo de transición del diámetro menor a el diámetro mayor igual al de entrada; d) *Zona de salida*: Constituida por un tramo recto sin cambio de diámetro y conduce hacia la tubería en uso.

Los componentes del aforado Tipo Venturi se diseñan para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales, la zona de contracción- expansión consta como su nombre lo dice de una contracción que puede ser curva o recta según el diseño propuesto, cada equipo propone el ángulo determinante en la longitud de la ampliación justo al final necesaria para normalizar el flujo. Una de las relaciones más determinantes en los Venturis es el grado de estrangulamiento que relaciona las áreas de la sección contruida con el área de entrada, se escribe con la letra m . La medición de la pérdida de energía en el estrangulamiento, se recomienda realizarla en dos secciones, una justo al final de D_1 y la segunda en la contracción D_2 , justo después de la terminación de contracción e inicio de la ampliación (ASME, 1983). Para realizar la medición la pérdida de energía entre las dos secciones señaladas existen metodología de cálculo de acuerdo al equipo usado en el laboratorio, el más recomendable es el manómetro de diferencial de mercurio instalado en los puntos indicados cubriendo toda superficie de los dos círculos.

La ASME (1983) presenta una ecuación deducida de la ecuación (1) para la determinación del gasto es función de un coeficiente de descarga, con el conocimiento de la línea de

distribución de presiones o línea piezométrica a partir del centro del tubo, si $h = (z_1 + v_1^2/2g) - (z_2 + v_2^2/2g)$, sustituyendo en la ecuación de continuidad $A_1 = A_2 v_2/v_1$, se obtiene la ecuación (2):

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (2)$$

El coeficiente C_d es determinado con pruebas experimentales de laboratorio, Smetana (1957) reportado por Sotelo (1979) presenta dos tablas en la determinación del coeficiente, función del estrangulamiento $m = A_2/A_1$ y del números de Reynolds en la sección del estrangulamiento.

La ASME (1983) reporta diferentes tablas y figuras para tipos de aforadores Venturi, la IOS (1991) reporta la estandarización que se debe de cumplir en la medición en Venturis, Ranald (1978) muestra coeficientes muy similares a los presentados por la ASME, USDI (1979) reporta y generaliza las recomendaciones de IOS (1991), por su parte Sotelo (1979) muestra un ejemplo con tablas de C_d basado en el estudio de laboratorio y representaciones un poco diferente a los reportados por IOS (1991).

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta numérica que permite la visualización espacial del fenómeno de estudio, al obtener una solución numérica a los problemas de movimiento de fluidos, con un alto grado de precisión entre el modelo planteado y los datos experimentales, lo que ha permitido una mejor comprensión del los fenómenos hidráulicos y de mecánica en general. Así por ejemplo, en ingeniería hidráulica se ha hecho investigación en el análisis de Válvulas (Davis, et al., 2002), Bombas (Zhen, 2000) o en la aplicación de canales abiertos (Wu, et al., 2000).

En Agricultura protegida, CFD ha sido una técnica usada para modelar el ambiente del invernadero y con ello plantear estrategias para la gestión del clima en invernaderos, mediante sistemas auxiliares de refrigeración o calefacción (Flores-Velazquez, et al., 2011, 2014).

En sistemas de riego presurizado es posible encontrar aplicaciones para el análisis de emisores de riego (Palau, et al., 2004) y dispositivos de inyección de fertilizantes (Manzano et al., 2005).

Debido a la complejidad del fenómeno ha sido necesarios discretizar el sistema y dejar fijas ciertas características del fluido, con lo cual aplicando las ecuaciones generales de balance de masa, momento y energía en una sustancia finita del flujo era posible plantear una ecuación que describe el movimiento de este, sin embargo, en la mayoría de los casos esta descripción era puntual y no era posible una representación espacial del sistema, lo que ha venido a resolver la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), (Anderson, et al, 1983).

El planteamiento de la dinámica de fluidos computacional, se fundamenta en la solución de las ecuaciones que define el movimiento de un fluido, combinando la Dinámica de fluidos, la programación y los métodos numéricos. En general el movimiento de un fluido está basado principalmente en procesos físicos, que pueden ser

planteados en términos matemáticos como una serie de ecuaciones en derivadas parciales para representar numéricamente el flujo. Si se considera un fluido incompresible (agua) dentro del dominio R_n durante un intervalo de tiempo $[0, t]$, la dinámica del flujo en cada punto (x, y) en un instante específico t está determinado por las variables de estado, densidad de masa (ρ, t) , el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$. El planteamiento diferencial se deriva de la aplicación de los principios de conservación de masa, momento y energía sobre un volumen de control, características incluidas en las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S); a partir del cual es deducida en su forma diferencial, que en una forma generalizada, puede ser expresada como la ecuación 3 (White, 1994).

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3)$$

La ecuación (3) contiene los cuatro términos que definen la dinámica del fluido: Inestabilidad, Convección, Difusión y Término fuente, la variable ϕ es una forma de variable dependiente, pudiendo ser masa (kg), velocidad (m s-1), temperatura (K), etc. y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico, en un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$, ρ es la densidad (kg m-3), t es el tiempo (s), ∇ denota el operador nabla, u la velocidad del fluido (m s-1), Γ coeficiente de difusión (m2 s-1), y S_ϕ el término fuente (o sumidero).

En este trabajo se aporta información sobre el funcionamiento de un Venturi bajo criterios de ecuaciones deducidas en forma diferencial e integral, partiendo de un equipo Venturi con características definidas y datos experimentales obtenidos en laboratorio reportado en la bibliografía. El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados obtenidos por simulación usando CFD con resultados experimentales del funcionamiento de un Venturi de características definidas reportadas en la bibliografía, los resultados obtenidos son base del prototipo recomendable a instalarse en sistemas de riego.

Materiales y métodos

Venturi de estudio: El Venturi presentado por Sotelo-Ávila (1979) es de un estudio reportado por Smetana (1957), Ilustración 1, tiene un diámetro en la zona inicial de $D1 = 0.15m$ y un diámetro en la zona de estrangulamiento de $D2 = 0.075m$, la transición entre diámetros en la zona de contracción es de forma cónica, la zona de expansión consta de una ampliación que va desde el final de la zona de contracción nuevamente al diámetro $D1$, el estudio propone un ángulo de 2.50 a 7.0 determinante para la longitud de la ampliación de salida, longitud necesaria para normalizar el flujo, el dato en la deflexión del manómetro es de 15 cm de columna de mercurio, tal como se muestra en la Ilustración 1, peso específico del mercurio igual a $\gamma_{Hg} = 13\,595 \text{ kg/m}^3$ y la viscosidad cinemática del agua a 10 OC es igual a $0.013 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$.

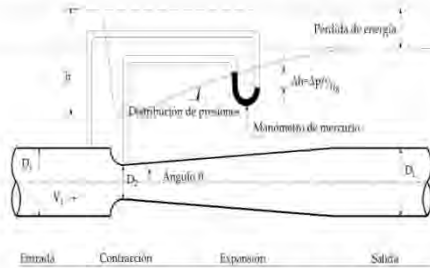


Ilustración 1. Venturímetro en una tubería.

La principal variables que se estudia en este trabajo y que afectan al aforador Venturi son las corrientes cinéticas. Estas pueden ser debido al disco impropio de la zona de entrada o de salida (velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias).

La relación $m = A_2/A_1$ se le llama grado de estrangulamiento y es uno del parámetro básico en la revisión del funcionamiento hidráulico del aforador. Con el conocimiento de la línea de distribución de presiones o línea piezométrica donde $h = (z_1 + v_1^2/2g) - (z_2 + v_2^2/2g)$ y de la ecuación de continuidad $A_1 v_1 = A_2 v_2$, sustituyendo en la ecuación 1 y en términos de la deflexión en el manómetro de mercurio, y al corregir los errores cometidos al no considerar las pérdidas de carga y al considerar m como el grado de estrangulamiento se reporta la ecuación (4).

$$v_2 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (4)$$

Dónde: A_2 = Área de la sección contraída (m^2); g = Aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$); γ_m = Peso específico del Mercurio ($kn m^{-3}$); γ = Peso específico del agua ($kn m^{-3}$); totales de energía (m), deflexión en el manómetro de mercurio $\Delta h = (m)$ y C_d = Coeficiente de descarga (adimensional).

Estos aparatos que se utilizan como aforadores y se instalan en tuberías, la zona de contracción consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga de energía, que se traduce en una baja de la línea piezométrica, este cambio es medido por equipo especial, existen en el mercado diferentes equipos para medir este cambio. Para Webber (1971) el diámetro D_1 de la contracción debe ser los suficientemente grande que la presión no caiga por debajo de 2 metros de columna de agua respecto de la presión absoluta, en esta presión hay tendencia que aparecen burbujas de aire existiendo la cavitación.

El Venturi mostrado en la Ilustración 1 es un manómetro de mercurio, muy utilizado en laboratorio y el gasto se puede determinar según la ecuación (5), Sotelo (1979).

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad (5)$$

En el Tabla 1 se indican las características geométricas del aforador reportado por Sotelo (1983) de acuerdo a Smetana (1957), la longitud de la entrada y salida es igual a $4D_1$.

Tabla 1. Características del Venturi experimental.

Diámetro (m)		Relación	Área (m^2)		Relación	Contracción		Long (m)
D_1	D_2	D_2/D_1	A_1	A_2	Áreas	Radio (m)	Angulo (grados)	Expansión
0.150	0.075	0.50	0.0177	0.0044	0.25	0.0375	3.5	0.6131

El resultado buscado con los resultados experimentales del funcionamiento de un Venturi de características señaladas y reportadas en la bibliografía es calcular el gasto. La velocidad de inicio es $V_1 = 1.533 m s^{-1}$, proponiendo como límites de estrangulamiento $m=0.25$ y con números de Reynolds para este estudio mayores de 10^5 Sotelo (1971). En la instalación de los aforadores Venturi en sistemas para riego, los puntos importantes que se deben de conocer son: la pérdida de energía total en el equipo y la presión absoluta en la contracción, se recomienda realizar la medición desde $4D_1$ antes de la contracción hasta $4D_1$ después de la ampliación, justo cuando el flujo se comporte como un fluido totalmente desarrollado, Webber (1971).

Dinámica de fluidos computacional (CFD): Para este procedimiento se utilizó el programa comercial ANSYS, Workbench, V 14.5. Este programa contiene interfaces para la generación de la geometría (design model), el mallado (meshing) y las simulaciones (Fluent). En general CFD utiliza una serie de pasos que pueden englobarse en tres grandes grupos:

- Pre-proceso.- A partir del modelo físico del Venturi se genera la geometría del dispositivo, los datos para realizar el dibujo son los reportados en la Tabla 1, (Ilustración 2), en este caso fue creado en forma 3-Dimensional para mejor representación de los flujos. Un paso que es básico para el análisis es el mallado (Ilustración 2), en el cual el dominio computacional es subdividido en número finito de elementos prismáticos donde las ecuaciones de conservación fueron aplicadas.
- Proceso.- Una vez generada la geometría, se importa al procesador donde se le adjudicación de valores a las características de frontera (Ilustración 2), entrada lado izquierdo y salida lado derecho, de igual manera, se establecen las hipótesis correspondientes respecto al solver a utilizar para conseguir la solución, Hipótesis de simulación: Solver: Pressure-Based, Segregado, Formulación: Implícita, Condición de tiempo: Estacionario, Modelo de Turbulencia: K-epsilon de dos ecuaciones, Escenarios de simulación i). Velocidad del fluido: Constante (velocidad) y Escenarios de simulación: i. y por último el inciso.
- Pos-proceso, los resultados se muestran de manera gráfica y escalar.



Ilustración 2. Construcción del modelo computacional por etapas.

Resultados y discusión

Método de revisión para el Venturi probado en Laboratorio: Se utiliza la metodología propuesta por Sotelo (1983), el dato de entrada es la velocidad de inicio es $v_1 = 1.533 \text{ m s}^{-1}$.

Primero se determina el coeficiente de descarga C_d (Ilustración 3), al relacionarlo con grado de estrangulamiento $m=0.25$ (dato, tabla 1), se obtiene $C_d=1.009$, la altura de columna de mercurio en la deflexión del manómetro, es dato, igual a $\Delta h = 15 \text{ cm}$, con la ecuación 5 se determina el gasto $Q=0.02698 \text{ m}^3/\text{s}$, por continuidad se determina la velocidad en la contracción $v_2=6.13 \text{ m}^3/\text{s}$, con la ecuación del número de Reynolds $R_e = \frac{D_2 v_2}{\nu}$, se obtiene $Re=3.54 * 10^5$, lo cual es

mayor a 10^5 y así termina el cálculo del gasto. La Ilustración 3 reemplaza a las reportadas por Smetana en función de mostrar una ecuación de relación estrangulamiento-coeficiente de descarga con R^2 igual 0.9972.

Al examinar los resultados con este procedimiento se observa que al realizar cualquier cambio de velocidad inicial es necesario conocer el cambio de altura de la columna en el manómetro de mercurio para así conocer el gasto con esas nuevas condiciones. Esto es, el gasto está relacionado con la altura de la columna en el manómetro de mercurio, lo que conduce a una sola ecuación con dos incógnitas. Con esta metodología de cálculo, como se ha dicho, para un venturi con medidas determinadas es necesario conocer la velocidad inicial, la altura en el manómetro diferencial de mercurio, m grado de estrangulamiento y así determinar de forma gráfica el coeficiente C_d y terminar con la utilización de la ecuación de gasto. Con este procedimiento no es posible realizar algún cambio. Para la comprobación teórica o visual con base en la herramienta mostrada no es suficiente, es necesario herramientas no convencionales, tarea pendiente para el ingeniero especialista en irrigación.



Ilustración 3. Coeficiente C_d en relación al grado de estrangulamiento m .

Método de revisión para el Venturi con CFD: El inicio al mostrar los resultados, es con la velocidad en la zona de entrada (D_1), los datos resultantes en CFD de velocidad en cada punto y en cada sección son vectores, valores puntuales, Ilustración 4. En la Ilustración 5 de acuerdo al diámetro (de izquierda a derecha, zona de entrada) se anota el valor resultante de vector velocidad, los valores resultantes tienen un valor igual a 0.0 ms^{-1} en la pared del tubo y un máximo de 1.8 ms^{-1} en el centro de tubo. Con estos valores del vector,

esto es, en forma de círculos, se determina la velocidad media con la ecuación (5), se realiza el mismo procedimiento para la zona de contracción y para la zona de salida, el valor medio resultante se reporta en el Tabla 2.

$$V_m = \frac{V_1 A_1 + V_2 A_2 + \dots + V_n A_n}{A_{total}} \quad (5)$$

En donde: V_m = velocidad media, V_n = velocidad en el círculo 1 hasta n , A_i = Área en el círculo 1 hasta n , A_{total} = Área total del tubo.

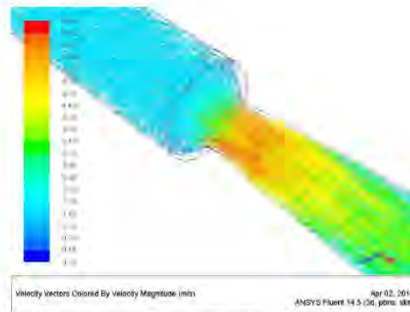


Ilustración 4. Distribución de velocidades.

En la Ilustración 5 se muestra los vectores resultados de la velocidad para la zona de entrada, igual se realizó para la zona de contracción, ampliación y por último la zona en donde el flujo es totalmente desarrollado llamada Zona de salida.

Para la presión los resultados son también vectores, igual en cada sección son valores puntuales no son medios, en la Ilustración 5 son los resultados en la zona de entrada, de acuerdo a cada longitud del diámetro (de izquierda a derecha), los valores resultantes tienen un valor en la pared del tubo igual a 78.7 cm de columna de mercurio a 78.4 cm en el centro de tubo, los resultados del CFD están en unidades de pascales y se cambian para presentarlos en altura de columna de mercurio.

Con estos valores del vector, esto es, en forma de círculos, se determina la presión media con la ecuación 6, se realiza el mismo procedimiento para la zona de contracción y para la zona de salida, el valor medio resultante se reporta en el Tabla (3), los resultados de la presión se presentan en unidades de pascales, cm de columna de Hg y en kg cm^{-2} .

$$P_m = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + \dots + P_n A_n}{A_{total}} \quad (6)$$

En donde: P_m = presión media, P_n = presión en el círculo desde 1 hasta n , A_n = Área en el círculo desde 1 hasta n ,

A_{total} = Área total del tubo.



Ilustración 5. Perfil de velocidades y presión (Zona de entrada).

Tabla 2. Resultados de la versión del caso experimental.

Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
Presión		Vel.		Presión		Vel.		Presión		Vel.	
Pascal	cm de Hg	kg/cm ²	media ms ⁻¹	Pascal	cm de Hg	kg/cm ²	media ms ⁻¹	Pascal	cm de Hg	kg/cm ²	media ms ⁻¹
104658	78.5	1.07	1.55	86639	65	0.88	5.55	101326	76	1.033	1.52

Al comparar los valores reportados experimentalmente por Sotelo (1979) y los obtenidos mediante CDF (Tabla 3), son prácticamente iguales, velocidad media, zona de entrada (1.53 m s⁻¹), gasto (0.027 m³ s⁻¹ (por continuidad) y presión en el manómetro diferencial, 15 cm de columna de mercurio Hg (diferencia de presión en cm de Hg entre la zona de entrada a la zona de contracción).

Una vez validado el modelo, se ensayaron con CFD ocho casos más, con velocidades medias desde 0.028 ms⁻¹ hasta 2.264 ms⁻¹, variación de gasto desde 0.005 m³ s⁻¹ hasta 0.040 m³ s⁻¹, esto es, se cumple continuidad. En el Tabla 3 se reportan los resultados de los ocho casos más (versiones V2 a la V9), la presión en unidades de pascales, cm de columna de Hg y en kg cm⁻², la velocidad media en la zona de entrada, zona de contracción y zona de salida en ms⁻¹. Para la determinación de los valores medios de las variables velocidad y presión se usó el mismo procedimiento de la versión VI, se utilizaron también las ecuaciones 5 y 6.

Del análisis de resultados mostrados en el Tabla 3, para el rango del gasto estudiado desde 0.005 m³/s hasta 0.040 m³/s se tiene la correspondencia pérdida de carga en cm de columna de mercurio, (inicio-final de la sección contracción).

Tabla 3. Resultados de las ocho versiones con CFD.

Versión	Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
	Presión	cm de mercurio	kg/cm ²	Media ms ⁻¹	Presión	cm de mercurio	kg/cm ²	Media ms ⁻¹	Presión	cm de mercurio	kg/cm ²	Media ms ⁻¹
V2	101478	76.1	1.01	0.285	100828	75.6	1.03	1.042	101326	76.0	1.033	0.258
V3	101829	76.4	1.03	0.577	99919	74.5	1.01	2.082	101323	76.0	1.033	0.569
V4	102419	76.8	1.04	0.866	96791	72.6	0.99	3.122	101322	76.0	1.033	0.867
V5	103223	77.4	1.05	1.140	93217	69.9	0.95	4.161	101321	76.0	1.033	1.126
V6	104206	78.2	1.06	1.424	88908	66.7	0.91	5.164	101321	76.0	1.033	1.454
V7	105397	79.1	1.08	1.725	82777	63.1	0.84	6.202	101320	76.0	1.033	1.690
V8	106720	80.1	1.09	1.985	76394	59.3	0.78	7.278	101320	76.0	1.033	2.045
V9	108301	81.2	1.10	2.268	69015	51.8	0.70	8.316	101319	76.0	1.033	2.234

Resultado, se expone eliminar la incertidumbre del coeficiente de descarga manjado en el Venturi de laboratorio al simplificar la relación gasto (m³ s⁻¹)-pérdida de carga (Hg) a una ecuación de potencia, Ilustración 6.



Ilustración 6. Determinación de las pérdidas sección contracción.

La forma de operación es sencilla y conduce a presentar así los resultados, una sola ecuación con una incógnita. Por ejemplo utilizar la Ilustración 6, manómetro diferencial de presión igual a 15 cm de columna de mercurio Hg, se obtiene un gasto de (0.027 m³ s⁻¹), y por continuidad se tiene la velocidad media, zona de entrada (1.53 m s⁻¹).

En otra parte de la discusión se muestra que presentar así un Venturi con la opción de datos de laboratorio no se puede determinar la pérdida de carga total entre las secciones zona inicial y zona final, en cambio con resultados presentados en el Tabla 3 y los datos de la presión en kg/cm² convertidos a centímetros de columna de agua, es una ecuación con una incógnita, esta relación se presenta en la Ilustración 7 para las condiciones de estudio presentadas.

Así utilizando la Ilustración 7, para gasto máximo de 0.040 m³ s⁻¹ se tiene la pérdida de carga total en la longitud de Venturi de 0.075 kg cm⁻², 75 cm de columna de agua o pérdida de energía total en el equipo. Se recomienda realizar la medición desde 4D₁ antes de la contracción hasta 4D₂ después de la ampliación hasta que su flujo se comporte como un fluido totalmente desarrollado.

Se destacan otros 3 incisos de resultados, a) la carga hidráulica de funcionamiento en la contracción del Venturi será con una presión mínima disponible de 0.4 kg cm⁻² para el gasto máximo de 0.040 m³ s⁻¹, así se cumple con la condición impuesta por Webber (1971) para la contracción, en donde la presión disponible de 0.4 kg cm⁻², es mayor de 0.2 kg cm⁻², condición impuesta para de evitar la cavitación, b) Por la condición anterior, el gasto límite superior para las dimensiones y condiciones de trabajo es precisamente el gasto de 0.040 m³ s⁻¹, y c) la pérdida de carga total para la longitud de Venturi es de 0.075 kg cm⁻². Los resultados de estos incisos son un punto importante para aclarar que sólo con CFD se puede reconstruir los datos experimentales y en éste caso para el Venturi reportado por Smetana (1957).

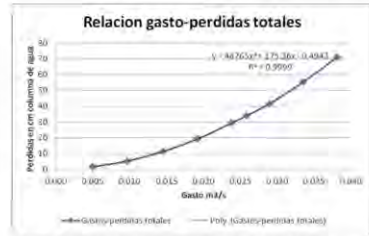


Ilustración 7. Determinación de las pérdidas sección inicial contra sección final.

Conclusiones

Se concluye que para las condiciones propuestas es posible ensayar diseños de Venturi bajo criterios de ecuaciones deducidas en su forma diferencial y modelo con la herramienta CFD y en su forma integral el funcionamiento hidráulico del Venturi de laboratorio. En la formulación integral el Venturi de laboratorio sólo se aplica para la condición presentada, no es posible hacer interpolaciones para las condiciones iniciales o diferentes a las iniciales, siendo resultado el análisis al aplicar la forma diferencial en estudio con CFD.

El conocimiento de las pérdidas de carga totales sólo se obtiene al realizar el ensayo con la ecuación de forma diferencial resuelta con planteamientos en CFD, conjuntamente simplificando la relación gasto-perdida de carga a una ecuación de potencia y eliminando la incertidumbre del coeficiente de descarga. Se concluye que para las condiciones expuestas es posible diseñar Venturis con CFD para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales y contar con más datos confiables para su instalación en sistemas de riego.

Referencias

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), *Fluid meters, their theory and application*, H.S. Bean, ed., Research Committee on fluid meters, sixth edition, New York, 1983.
- ANDERSON, JR., J. D. *Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications*. Mc. Graw-Hill. USA. 1995, 328 p.
- CHOW, V. T., *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1959.
- DAVIES, J. A. Y STEWART, M. *Predicting globe control valve performance*. Part I. CFD. modeling. ASME Journal of Fluids Engineering. Vol. 124, 2002.
- FLORES-VELAZQUEZ, J. MEJIA, E. ROJANO, A Y MONTERO, J. I. *Análisis del clima en un invernadero con ventilación mecánica*. Agrociencia, 2011.
- HENDERSON, F. M., *Open Channel Flow*, Macmillan, Nueva York, 1966.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (IOS), *Measurement of flow by means of pressure differential devices*, ISO 5167-1, Geneva, Switzerland, 1991.

LEVY, E., *Mecánica de los fluidos*, Instituto de ingeniería, México, UNAM, 1957, pp 266.

MANZANO, J Y PALAU, G. *Hydraulic Modeling of Venturi injector by means of CFD*. ASAE International meeting. Tampa Florida, 2005.

PALAU, G, ARVIZA, J. Y FRANKEL S. *Tree-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation*. 34TH aiaa Fluid Dynamics Conference and exhibit. IN AIAAA-2004- Portland. USA, 2004.

J. SMETANA, *Hidráulika*, Ceskoslovenka Akademie. VED, Praga, (1957), Referencia de SOTELO-ÁVILA, G. Hidráulica general, México D.F: Limusa, 1979, 277 pp.

SOTELO-ÁVILA, G. *Hidráulica general*, México D.F: Limusa, 1979, 277 pp.

RANALD, V. G. *Mecánica de fluidos e Hidráulica*, McGraw-Hill, segunda edición, México D.F. 1978

SARH. *Proyecto de Zonas de Riego*, Dirección de Proyectos de Irrigación, Departamento de Canales, México. D. F. 1973, 567 pp.

USDI (U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR), *Water Measurement Manual*, Bureau of reclamation Third edition, U.S. Govern printing office, Denver, 1979.

WEBBER, N. B., *Fluid Mechanics for Civil Engineers*, Primera edición, Chapam and Hall, 1971, 330 pp.

WHITE M., FRANK, *Fluid Mechanics*, Tercera edición, McGraw Hill, inc., 1994, 736 pp.

WU, W., RODI, W Y WENKA, T. *3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 126 Num 1, (2000).

ZHENG, G. *Applications of CFD tools to design and development of pumps*. Turbomachinery. Vol. 28, 11.649-656, 2000.

- c) 2014. Análisis Hidráulico de un venturí con fines agrícolas. Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

IAHR

AIH

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SANTAGO, CHILE, AGOSTO 2014**

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DE UN INYECTOR VENTURÍ USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)**

Jorge Flores-Velázquez, Waldo Ojeda Bustamante, Mauro Iñiguez Covarrubias
Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Mor. México.
jorge_flores@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

Desde el punto de vista agrícola, la producción de cultivos está asociada con una distribución balanceada de elementos nutritivos que pueden ser aplicados mediante el sistema de riego. Aun cuando más del 70 % del riego sigue siendo por gravedad, principalmente para evitar el uso de energía, también es cierto que cuando se habla de riego localizado la aplicación de la solución nutritiva es inherente. La decisión de instalar un sistema de riego presurizado, está influenciada por un lado atendiendo la inversión inicial pero sobre todo por el costo de la energía para operar dicho sistema. En un sistema de riego localizado el principal sumidero de energía está relacionado con el sistema de inyección y filtrado. Aun cuando existen alternativas para su uso, crear un vacío para provocar la succión es uno de los más usados en riego. La pérdida de carga hidráulica originada por el dispositivo de inyección, debe ser suficiente para provocar la inyección. Para los caudales usados en riego, el diseño del inyector venturí (dimensiones) y su análisis hidráulico reducen la pérdida de energía. En este trabajo se construye un inyector venturí y se simula usando dinámica de fluidos computacional (CFD) para determinar las características del venturí para que ocurra la inyección con la mínima pérdida de energía. Bajo estas condiciones se observa que la máxima succión ocurre 10 mm después de la disminución del diámetro y esta oscila los 18 000 Pa de presión.

ABSTRACT:

Considering agricultural aspects, crop production is associate with a balanced application of crop nutrients that can be applied through the irrigation system. Although, gravity irrigation is the main irrigation application method with more than 70 % agricultural area, mainly to avoid the energy use, the pressurized irrigation systems usually have a fertilization injection component to the irrigation system. The decision to install a pressurizing irrigation system normally is postponed for the initial inversion required, but above all for the energy demanded. In a pressure irrigation system, filter and injection system are the main energy sinks. The hydraulic head lost should be large enough to generate the solution injection. For the flows used in the field, a good Venturi-type injector with hydraulic analysis optimizes energy loss. Even there are alternatives for fertilization injection; creation of a vacuum to generate the "nutritive solution" suction is the most common injection system. In this work, a Computational Fluid Dynamics program (CFD) is used to analyze the injection process to determine the minimum head loss and the influence of the Venturi dimensions in the head-loss decay. The results show that maximum suction is reached 10 mm after reduction of diameter point with a pressure value about 18 000 Pa.

PALABRAS CLAVES: *Dinámica de Fluidos, Modelo de turbulencia, dispositivo hidráulico*

KEYWORDS: *Fluid dynamics, Turbulence model, Hydraulic device*

INTRODUCCIÓN

En ingeniería agrícola son extensos los procesos que involucran el movimiento de los fluidos, sean gases (compresibles) o líquidos (incompresibles), lo que resalta la importancia de la mecánica de fluidos como disciplina científica que pretende describir las leyes a partir de las cuales es posible detallar el comportamiento de los fluidos, bajo conocidas condiciones de frontera o de inicio.

Desde el punto de vista agrícola, y específicamente en ingeniería de riego el cálculo del caudal y la potencia del sistema, es fundamental en el uso eficiente de los recursos, agua, suelo y energía. En este sentido, cada dispositivo que "consume" energía y en consecuencia obliga a incrementar la potencia en el cabezal de bombeo, exige un diseño preciso, con lo que se pretende disminuir al máximo las pérdidas.

Entre los dispositivos considerados un "sumidero" de energía, se encuentra el equipo de filtración e inyección de fertilizantes. Debido precisamente al incremento en los energéticos se han buscado alternativas de inyección pasiva, entre los que destaca un sistema venturí, estructura de control y medición de caudal que mediante un diseño característico genera condiciones hidráulicas que permite la inyección volumétrica de la solución nutritiva.

Debido a la complejidad del fenómeno ha sido necesaria una discretización del fenómeno, para hacer un análisis fractal del sistema. El desarrollo de herramientas numéricas ha permitido la modelación dinámica asumiendo condiciones físicas y dejando fijas ciertas características del fluido, es posible resolver las ecuaciones generales de balance de masa, momento y energía en una sustancia finita del flujo y con ello contar con una ecuación que describe el movimiento de este.

En la mayoría de los casos la descripción del flujo solo podía hacerse de manera puntual asumiendo un fluido homogéneo, lo cual desde luego dista mucho de ser cierto y no era posible una representación espacial del sistema, lo que ha venido a resolver la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

CFD es una herramienta numérica que permite la visualización espacial del fenómeno de estudio, al obtener una solución numérica a los problemas de movimiento de fluidos, con un alto grado de precisión entre el modelo planteado y los datos experimentales, lo que ha permitido una mejor comprensión de los fenómenos hidráulicos y de mecánica en general. Así por ejemplo, en ingeniería hidráulica se ha hecho investigación en el análisis de Válvulas (Davis et al., 2002), bombas (Zhen, 2000) o en la aplicación de canales abiertos (Wu et al., 2000).

En Agricultura protegida, CFD ha sido una técnica usada para modelar el ambiente del invernadero y con ello plantear estrategias para la gestión del clima en invernaderos, mediante sistemas auxiliares de refrigeración o calentamiento (Flores-Velázquez et al., 2011). En sistemas de riego presurizado es posible encontrar aplicaciones para el análisis de emisores de riego (Palau et al., 2004) y más recientemente dispositivos de inyección de fertilizantes (Manzano et al., 2005).

Como resultado de las investigaciones y la información relacionada que de esta se deriva, es posible plantear modificaciones a los dispositivos con el fin de hacer más eficiente su uso, con la ventaja que una vez probado el modelo, las modificaciones pueden hacerse en poco tiempo y sin la necesidad de montar experimentos lo que se traduce en un ahorro en tiempo y económico.

En Ingeniería agrícola, el funcionamiento de un dispositivo en concreto generalmente está condicionado al funcionamiento del todo como sistema, así por ejemplo, la emisión de caudal de un gotero, será el reflejo de la presión que le otorgue la bomba, que a su vez, estará en función de componentes incluyendo cabezal de filtración e inyección. En un dispositivo Venturí un factor crítico son las altas pérdidas de carga necesarias para provocar la inyección, además de las variaciones en caudal que se originan debido a una variación de carga a nivel del inyector, lo que se traduce en un pobre coeficiente de uniformidad.

El planteamiento de la dinámica de fluidos computacional se fundamenta en la solución de las ecuaciones que define el movimiento de un fluido. En general el movimiento de un fluido está basado principalmente en dos procesos físicos, la diferencia de presiones y la diferencia de

temperatura; estos procesos físicos pueden ser planteados en términos matemáticos como una serie de ecuaciones en derivadas parciales para representar las leyes que gobiernan el flujo. Si se considera un incompresible (agua) dentro del dominio $\Omega \subset R^n$ durante un intervalo de tiempo $[0, t]$, la dinámica del flujo en cada punto (x, y) en un instante específico t está determinado por las variables de estado, densidad de masa $\rho(x, t)$, el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$. El planteamiento diferencial se deriva de la aplicación de los principios de conservación de masa, momento y energía sobre un volumen de control, características incluidas en las ecuaciones de Navier Stokes(N-S); a partir del cual se deriva la forma diferencial que tiene mayor aplicación y en una forma generalizada puede ser expresada como la ecuación 1 (Anderson, 1995).

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \phi) = \nabla(\tau \nabla \phi) + S\phi \quad [1]$$

La ecuación contiene los cuatro términos que definen la dinámica del fluido: Inestabilidad, Convección, Difusión y Término fuente, la variable ϕ es una forma de variable dependiente, pudiendo ser masa (kg), velocidad ($m\ s^{-1}$), temperatura (K), etc. y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico, en un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$, ρ es la densidad ($kg\ m^{-3}$), t es el tiempo (s), ∇ denota el operador nabla, u la velocidad de viento ($m\ s^{-1}$), Γ coeficiente de difusión ($m^2\ s^{-1}$), y S el término fuente (o sumidero).

DESARROLLO DEL ARTÍCULO

En general CFD utiliza una serie de pasos que pueden englobarse en tres grandes grupos. A. Pre proceso. En esta etapa la geometría del dispositivo fue creado en forma 3-Dimensional (Figura 1B), misma que fue subdividida en un número finito de elementos prismáticos donde las ecuaciones de conservación fueron aplicadas. B. Proceso.- Una vez generada la geometría, se importa al procesador donde se le adjudicación de valores a las características de frontera es el siguiente paso, de igual manera, se establecen las hipótesis correspondientes respecto al solver a utilizar para conseguir la solución, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1.- Condiciones de frontera para la simulación

Hipótesis de simulación	
Solver	Segregado
Formulación	Implícita
Condición de tiempo	Estacionario
Modelo de Turbulencia	K-ε de dos ecuaciones
Escenarios de simulación	
Velocidad de entrada	Constante 2 ms-1
Presión	Constante 100000 Pa

La tercera etapa es C. Posproceso. Los resultados se muestran de manera gráfica y escalar. Para este procedimiento el programa comercial ANSYS WORKBENCH V 14.5 fue usado. Este programa contiene las interfaces para la generación de la geometría (design model), el mallaado (meshing) y las simulaciones (Fluent). (Figura 1)

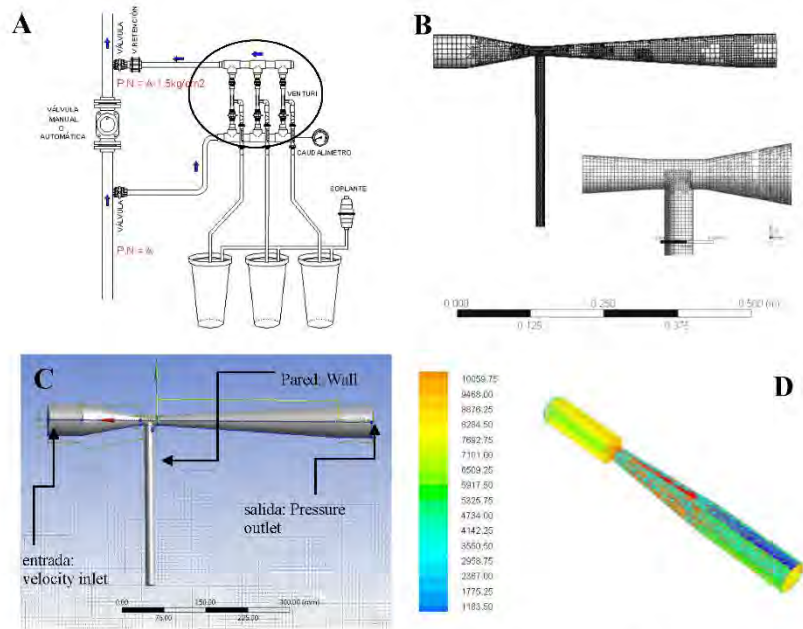


Figura 1.- Proceso de construcción del modelo computacional

La instalación de un dispositivo venturí, con fines de inyección de fertilizante puede ser de lo más variada. La figura 1A muestra una alternativa de tres venturís, idealmente para ingresar la solución desde tres tanques. La figura 2 muestra los componentes básicos del dispositivo venturí, una zona de entrada, la zona de contracción que modifica el flujo y que hidráulicamente genera la succión, la zona de expansión, teóricamente con la SN ingresados y la zona de salida que lleva al sistema de riego.

Desde el punto de vista hidráulico, existe una relación directa entre la geometría del inyector y su desempeño, como se observa en la figura 2, independientemente de las dimensiones cualquier dispositivo inyector está compuesto por una zona de entrada con un diámetro D_1 , la parte ahogamiento o garganta, con diámetro 2 (D_2) y la salida nuevamente hacia el sistema una vez ocurrida la sección, con un diámetro 3 (D_3).

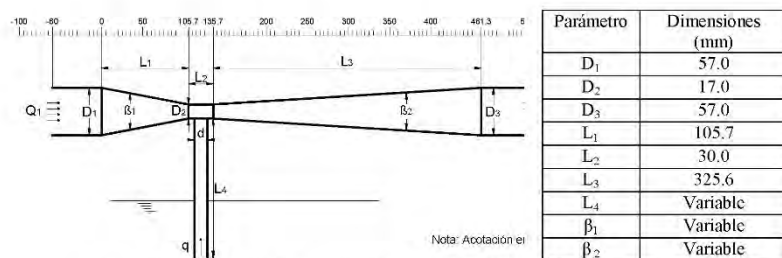


Figura 2.- Características geométricas de un Inyector Venturí.

Para conocer las pérdidas de carga y el caudal para estimar el volumen de inyección, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli y continuidad entre la entrada y la salida. Cuando se hace la inyección de la solución nutritiva, para mantener el balance de masa, los caudales deben permanecer constantes, no así las velocidades debido a las diferencias en los diámetros; el análisis puede hacerse aplicando la ecuación 2.

$$Q_3 = Q_2 + q \quad [2]$$

Donde q es caudal inyectado (lps)

Q_3 y Q_2 caudales de entrada y salida respectivamente

La pérdida de carga estará en función de la Longitud de garganta (L_2), ángulo de tobera y difusor (β), actualmente existen rangos que aconsejan para obtener el mejor funcionamiento, sin embargo el análisis sigue siendo complejo. Aun cuando existen relaciones que permiten estimar las pérdidas de carga en función de las geometrías, lo cierto es que además de lo complicado del cálculo, en el proceso de deducción se han implicado criterios empíricos para su solución. Por esto, La dinámica de fluidos computacional ofrece un apoyo que combina la parte experimental con el análisis teórico para mostrar, de manera gráfica la dinámica del fluido como resultado del proceso de simulación.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con la simulación numérica, la distribución en el flujo y los campos de presión del dispositivo inyector, en este caso de un venturí fueron obtenidos, así como los campos escalares de esta misma geometría. Para la optimización del diseño es importante el análisis de la influencia de los parámetros estructurales que afectan el desempeño hidráulico del inyector.

Mediante la técnica de CFD se pretende mostrar una herramienta de análisis, para la descripción hidráulica del fenómeno de inyección mediante un dispositivo venturí, con la ventaja de obtener imágenes espaciales de los flujos a la entrada, como las que se muestran en la figura 3A. En esta misma figura (3B) se tiene una representación escalar de la presión en la longitud del inyector. Esta apreciación permite distinguir las características del flujo en la inyección y salida del dispositivo, con el fin de documentar aspectos sobre el funcionamiento hidráulico de un inyector venturí y su relación con las geometrías de diseño.

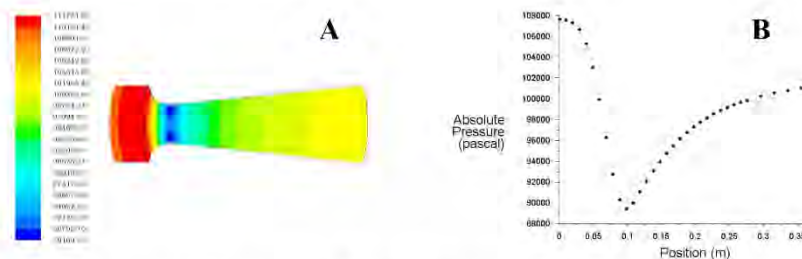


Figura 3.- Distribución espacial de las presiones (Pa) en el venturí (A) y Valores escalares de la presión al centro de la contracción, en la longitud del Venturí (m).

De la figura 3 se deriva la discusión respecto de la posición donde ocurre la mayor pérdida de presión y en consecuencia el mejor punto de inyección. Pero también los valores de pérdida de

carga que con estas dimensiones ocurren y en el caso que se simula, oscila los 30 000 pascales, es decir 3 mca mínimos para que ocurra la inyección.

En la figura 4 un perfil de velocidad del agua se muestra con relación a la longitud de la garganta del inyector, el cual obviamente coincide con el punto de mayor presión. Desde el punto de vista de la ingeniería de riego, la Dinámica de Fluidos Computacional es una herramienta robusta que ha de permitir el uso eficiente de los recursos agua y fertilizante. Pero además, desde el punto de vista académico, al permitir la visualización de los vectores del agua e identificar las variaciones puntuales de las propiedades del fluido de manera gráfica.

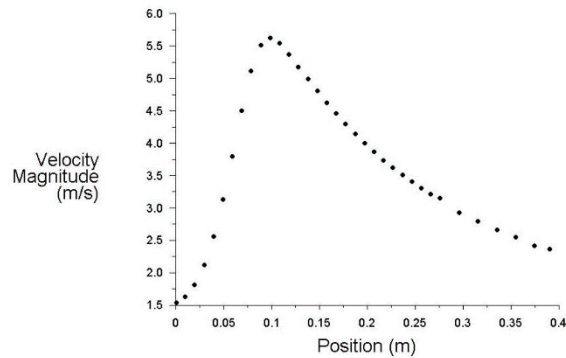


Figura 4.- Perfil longitudinal de la velocidad del agua en la contracción del venturí.

Para el dispositivo venturí de la figura 2, el objetivo es lograr la inyección del fertilizante con el conducto L_4 de diámetro "d" con la menor pérdida de carga; ese mismo dispositivo es simulado con CFD cuyas características geométricas se muestran en la tabla de la figura 2. Los resultados pueden observarse en la figura 5.

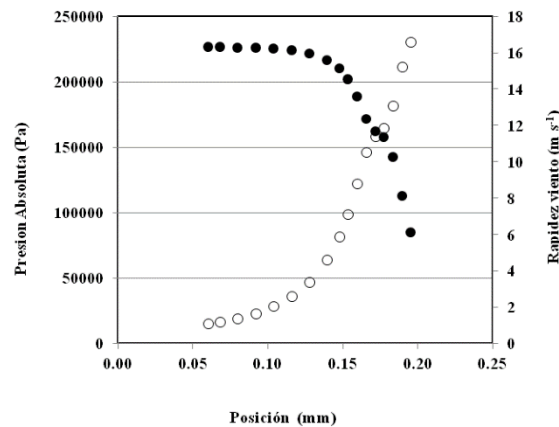


Figura 5.- Perfil de presión y velocidad del agua en la contracción del venturí para inyección de fertilizante.

La posición de entrada del tubo de entrada está colocado a la mitad de la contracción, sin embargo de la Figura 5 se observa que no es precisamente aquí donde ocurre la mayor velocidad y en consecuencia la mayor "succión". La representación visual de la Figura 5, puede ser vista de manera esquemática en la Figura 6 de presión y 7 de velocidad del fluido.

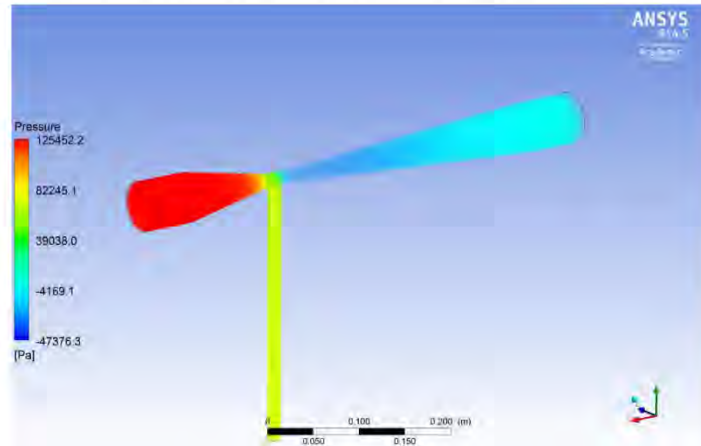


Figura 6.- Vista tridimensional de la distribución de presiones (Pa) en el dispositivo Venturi

La figura 6 muestra que en la zona de la contracción, la presión mínima existe a la salida de esta, como requisito para que la inyección funcione; como lo comenta Manzano, (2013) con una presión media de 10 mca para que el emisor funcione, si se contemplan 3 mca para que ocurra la succión, mas el cabezal de inyección, etc. se consideran 1.5 kg cm⁻², una presión suficiente a la salida del inyector para un correcto funcionamiento del sistema de riego.

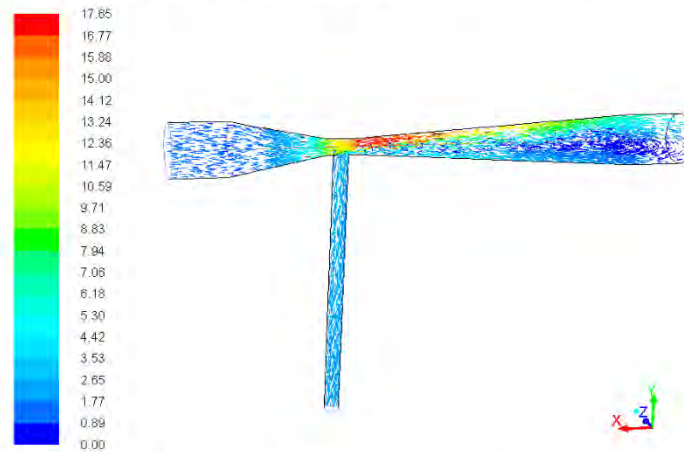


Figura 7.- Comportamiento de los vectores de velocidad del flujo (m s-1) en las zonas del venturi con inyector.

Así mismo, la figura 7 permite observar las variaciones de velocidad del fluido que se derivan de la contracción que con fines de inyección, de manera inversa a las presiones tal como se muestra de manera escalar en la figura 5.

En este trabajo se simulan 2 ms⁻¹ a la entrada y el incremento en la zona de contracción supera los 15 m s⁻¹ de rapidez del fluido, debido a esta aceleración otro tema interesante por analizar sería la probabilidad de que ocurra cavitación, en cuyo caso, geometrías diferentes y/o materiales diferentes pueden ser probados de tal manera de lograr el mejor diseño para lograr un equilibrio entre fuente y sumidero

CONCLUSIONES

Se muestra de manera escalar y vectorial, las variaciones en cuanto a presión y velocidad que ocurre en un dispositivo venturi con fines de inyectar la solución nutritiva para riego; en este sentido queda demostrado que existe una relación directa entre el incremento de la velocidad en la zona de contracción o garganta y en consecuencia la reducción en los campos de presión de manera inversa.

Las características geométricas de un dispositivo venturi están fuertemente relacionadas con el proceso de inyección de la SN y en consecuencia con el desempeño del sistema de riego. Debido a las rápidas variaciones que ocurren en un espacio geométrico tan pequeño, el diseño de este dispositivo debe ser definido tomando en cuenta las necesidades específicas atendiendo parámetros de la dinámica de fluidos.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta numérica robusta en cuanto al cálculo con aplicaciones diversas en fluidos compresibles e incompresibles. Es también una herramienta de auxilio en la ecdémica, que permite el mejor entendimiento de procesos de la mecánica de fluidos y en este caso, en la Ingeniería de Riego.

REFERENCIAS

- Davies, J.A. y Stewart, M** (2002). "Predicting globe control valve performance. Part I. CFD modeling". ASME Journal of Fluids Engineering. Vol. 124
- Flores-Velázquez, J. Mejía, E. Rojano, A y Montero, J.I.** (2011). "Análisis del clima en un invernadero con ventilación mecánica". Agrocienca.
- Manzano, J y Palau, G.** (2005) Hydraulic Modeling of Venturi injector by means of CFD. ASAE International meeting. Tampa Florida
- Palau, G. Arviza, J. y Frankel S.** (2004) "Tree-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation". 34th aiaa Fluid Dynamics Conference and exhibit. IN AIAAA-2004- Portland. USA.
- Wu, W., Rodi, W y Wenka, T.** (2000). 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Vol 126 Num 1.
- Yanqi Sun and Wenquan Niu (2012) "Simulating the effect of structural parameters on the hydraulic performances of venturi tube". Modelling and simulating in Engineering. doi: 10.1155/2012
- Zheng, G.** (2000) Applications of CFD tools to design and development of pumps. Turbomachinery. Vol 28, 11.649-656.

ANEXO B Manual De Uso De Los Programa Computacionales

B1. Diseño del sistema de riego usando IRRICAD

Ingresar detalles de diseño

Según el diseño agronomico y el proyecto tipo se tienen los siguientes datos:

- Espaciamiento entre plantas: 0.30 m.
- Espaciamiento entre surcos: 1.0 m
- Cantidad de sectores de riego: 12
- Tipo de sistema: Cinta de goteo
- Gasto requerido por cada gotero 1.26 l/h

Dentro de la plataforma de IRRICAD se ejecutó el comando *Archivo/Nuevo* para iniciar con un diseño nuevo. En *Configuración/Riego* se eligió diseño específico y se seleccionó una base de datos, para este caso IRRICAD.mdb (**Figura. 88**), que contiene las características de diferentes emisores, tuberías, válvulas y diversos accesorios que se utilizaron en el diseño. Se cambió el ancho de la línea de tubería de zona a 2 y ancho de línea de tubería principal a 3, con el fin de distinguir las tuberías al momento de diseñar. Se seleccionó las unidades utilizadas, que para este caso fueron del sistema métrico como se muestra en la **Figura. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.88**.

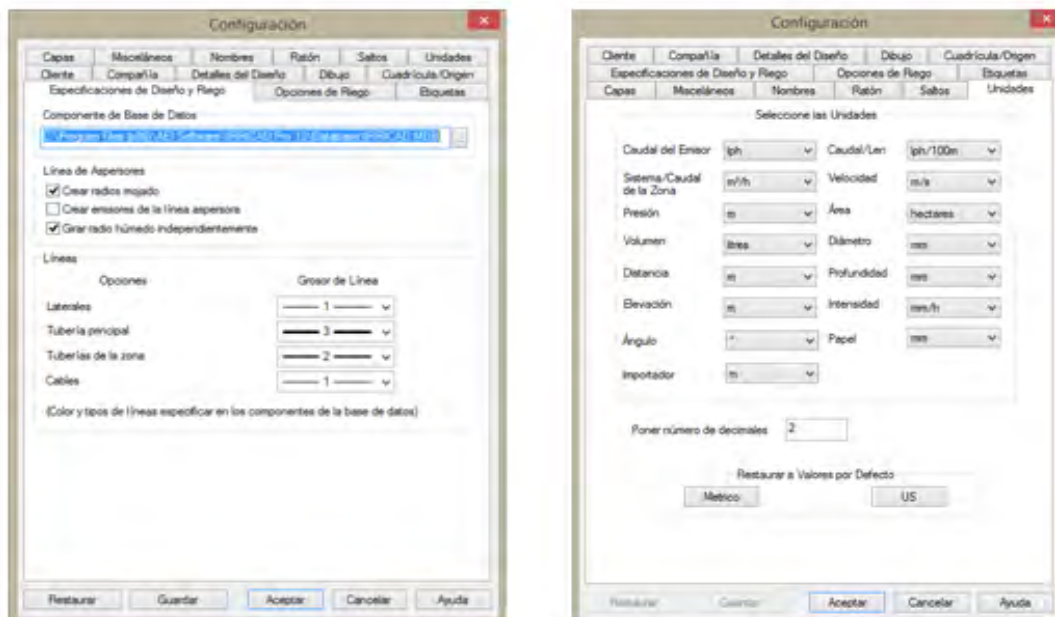


Figura 88. Selección de la base de datos y del sistema de unidades

Ingresar información de fondo

La topografía se puede crear desde IRRICAD o importarse en un formato aceptado por el programa. Un archivo DXF existente que contenga datos de elevación se puede importar en IRRICAD así como archivos DWG, VCD, GCD, SHP y MIF.

IRRICAD al igual que la topografía puede importar o crear el área de riego mediante sus herramientas, se puede ingresar en polígonos a nivel bloques de riego o como un solo polígono que contenga la totalidad del área y dividirse dentro del programa.

Para el diseño del proyecto tipo se utilizó un archivo DXF para importar las curvas de nivel y el área a nivel bloques de riego como se muestra en la **Figura. 89**.

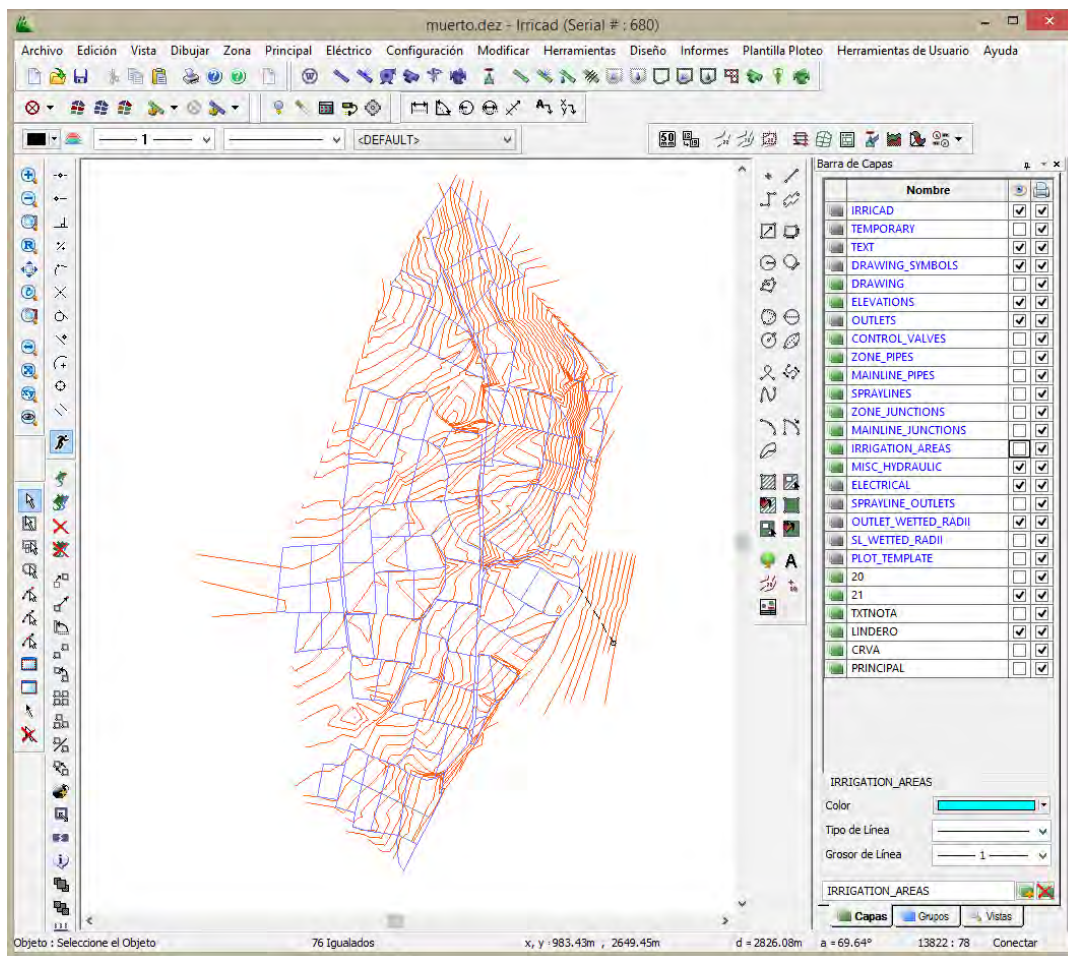


Figura 89. Importación de archivo de elevaciones y distribución parcelaria

Estructura del Sistema de riego

El programa diseña el sistema de riego de acuerdo a parámetros: hidráulicos y económicos, sentido de riego, emisores, ubicación y abastecimiento de la fuente. Para el diseño de los bloques de riego se seleccionó individualmente cada uno y

se ejecutó la herramienta *Zona/Bloque de Riego por Cinta de Goteo*, se eligió una cinta de goteo que cumplió los requerimientos especificados del diseño tipo, en la opción "Presión de entrada" se dejó la que el programa proporciona según la base de datos, posteriormente se eligió el espaciamiento entre laterales y su dirección.

En la pestaña de bloque se seleccionó el tipo de tubería y válvula, así como la ubicación de esta.

Para el presente diseño se eligió una cinta Eurodrip PC2 Dripline 16MM/0.34GPH/12 IN con espaciamiento entre laterales de 1 m (**Figura. 90**), la opción "regulado" se manejó desactivada, debido a que corresponde a goteros autocompensados, el cual no es el presente caso.

La dirección del lateral se determinó manualmente haciendo referencia a una línea perimetral del bloque de riego o una dirección arbitraria según el criterio del usuario.

El programa selecciono la tubería automáticamente de acuerdo a los parámetros hidráulicos del diseño. En caso de que el usuario requiera utilizar un diámetro específico este se debe indicar. Se seleccionó la válvula Nelson Solenoid Control Valve 2" (**Figura. 91**) la cual resulto la más apropiada al caudal del bloque de riego y que presentaba la menor pérdida de carga.

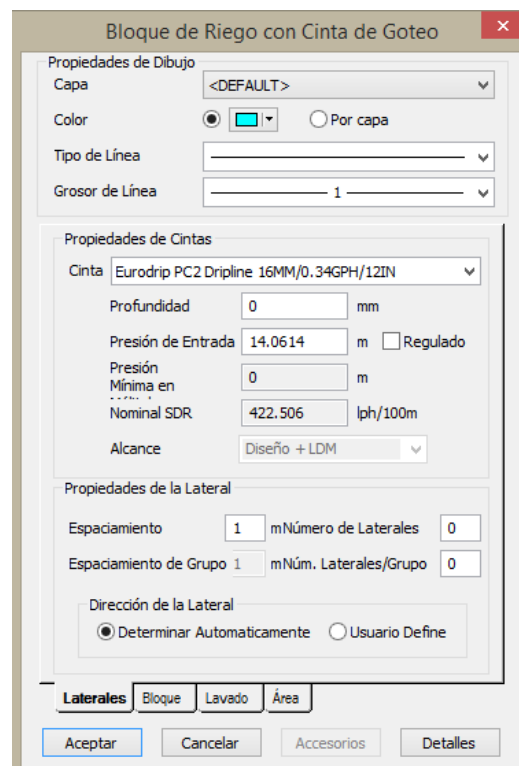


Figura 90. Parámetros de diseño para laterales de zona de riego

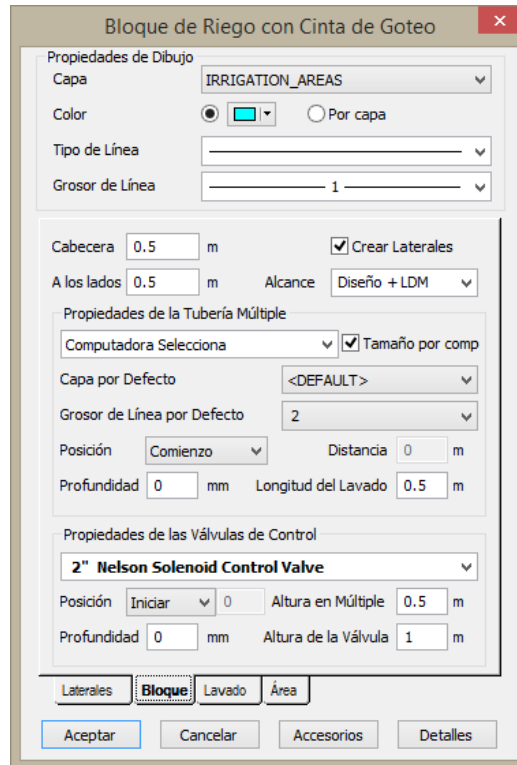


Figura 91. Parámetros de diseño para bloque de zona de riego

El programa realizó el trazo del lateral, la tubería secundaria y la ubicación de la válvula de control automáticamente como se muestra en la **Figura. 92**.

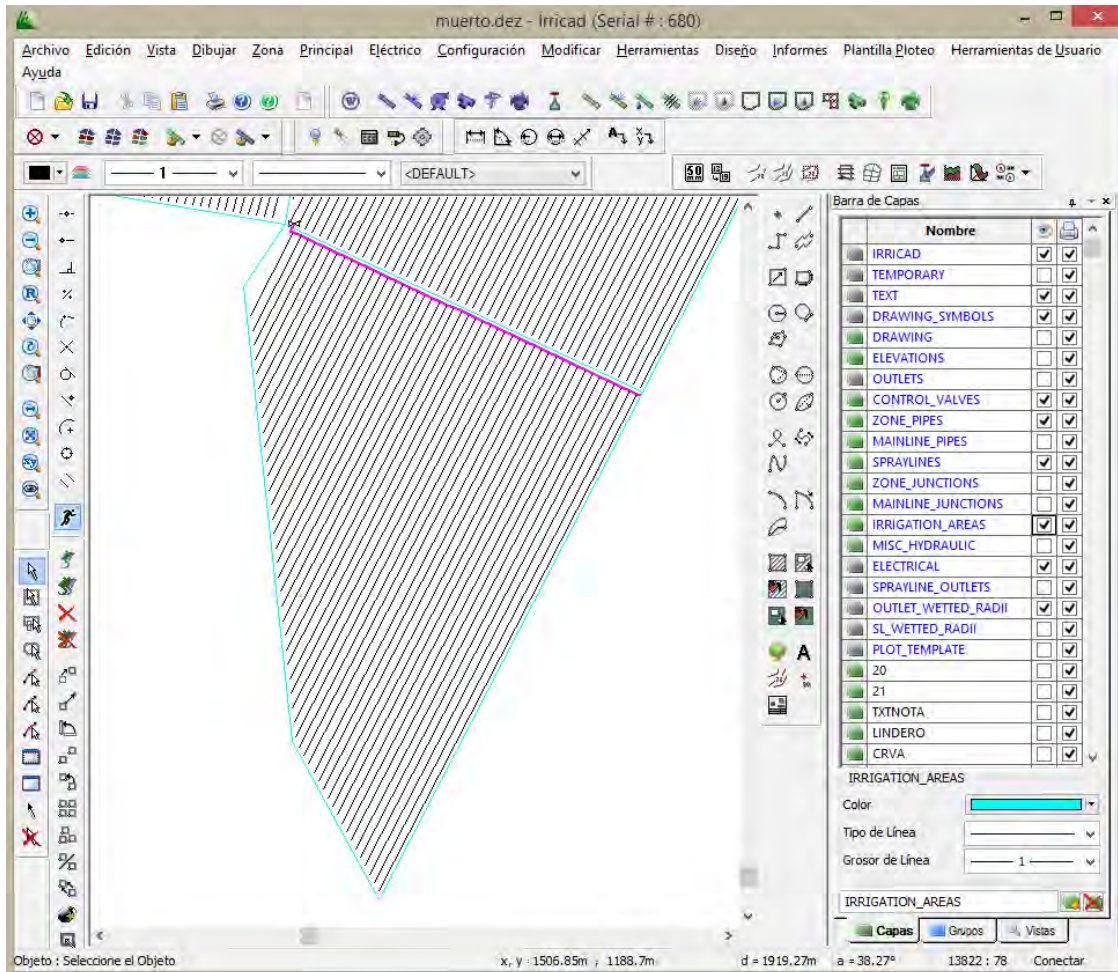


Figura 92. Zona de riego con líneas laterales, secundaria y válvula de control

El diseño de algunos bloques no fue posible realizarlo de manera automática, por la complicación en el trazo de la tubería secundaria, por lo que se utilizó la herramienta *Zona/Bloque de Cinta de Goteo* (**Figura. 93**) para dibujar los laterales, posteriormente se dibujó la tubería secundaria con la herramienta *Zona/Cortar Tubo* y finalmente se ubicó la válvula de control con la herramienta *Zona/Válvula de Control*, se utilizaron los mismos parámetros que en el caso de diseño automático.

Bloque de Cinta de Goteo

Propiedades de Dibujo

Capa: SPRAYLINES

Grosor de Línea: 1

Propiedades de la Cinta

Cinta: Eurodrip PC2 Dripline 16MM/0.34GPH/12IN

Profundidad: 0 mm

Presión de Entrada: 14.0614 m Regulado

Presión de Mínima en: 0 m

Nominal SDR: 422.506 lph/100m

Alcance: Diseño + LDM

Propiedades de la lateral

Espaciamiento: 1 m Número de Laterales: 0

Espaciamiento de Grupo: 1 m Núm. Laterales/Grupo: 0

Dirección de la Lateral

Determinar Automáticamente Polilínea

Usuario Define

Aceptar Cancelar

Figura 93. Parámetros de diseño para laterales de zona de riego

En la **Figura. 94** se muestra el diseño manual de una zona de riego, contiene cintas regantes, tubería secundaria y válvula de control

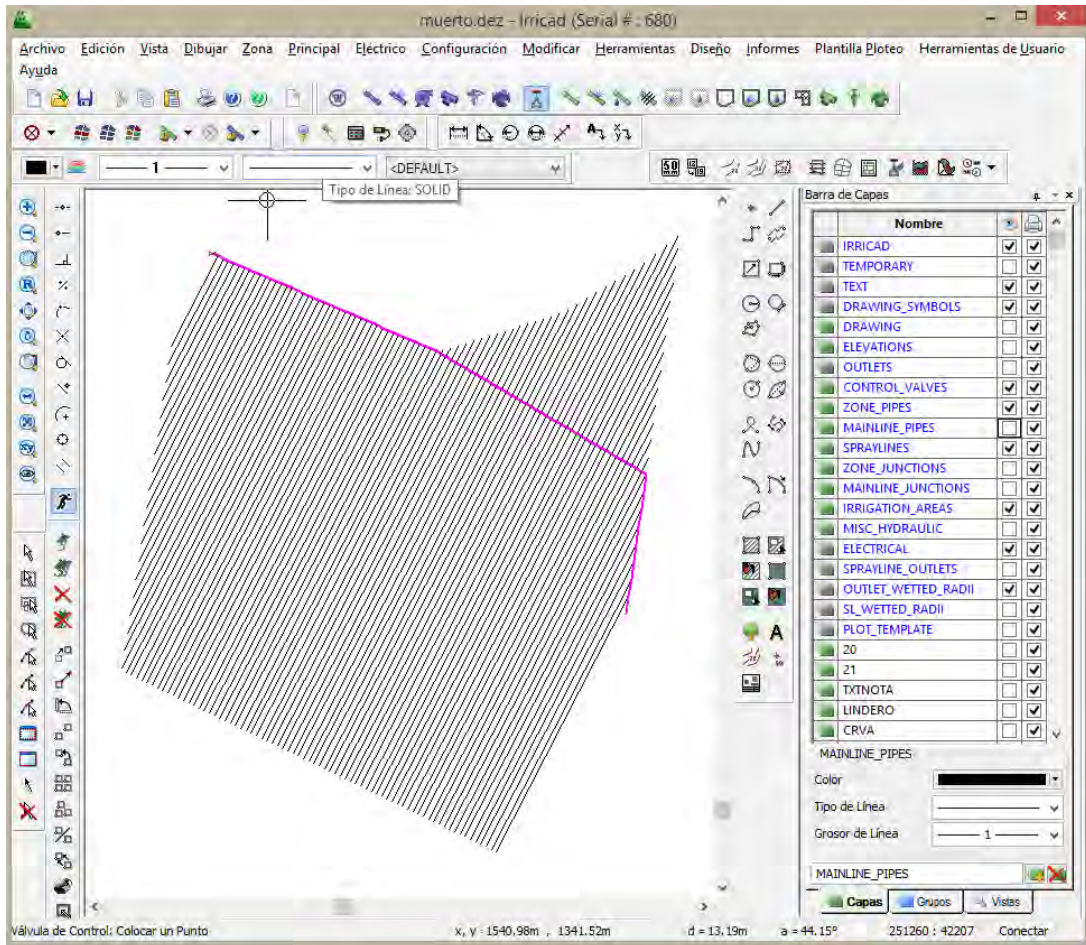


Figura 94. Zona de riego con líneas laterales, secundaria y válvula de control

Finalizado el dibujo de todas las zonas de riego con sus componentes, se dibujó la tubería principal.

Se utilizó la herramienta *Principal/Tubería* para trazar la tubería principal y se indicó que se escogieran automáticamente los materiales de la base de datos seleccionada (Figura 95), las bifurcaciones que presenta la tubería, se unieron mediante la herramienta *Principal/Unión*.

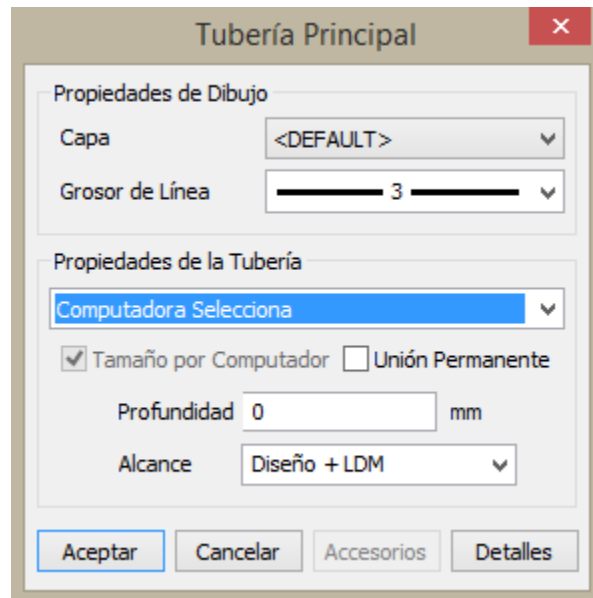


Figura 95. Parámetros de diseño para tubería principal

Al finalizar el trazo de la tubería principal se utilizó la herramienta *Principal/Fuente de Agua* y se ingresó la ubicación de la fuente de abastecimiento.

IRRICAD tiene la opción de diseñar la fuente de abastecimiento adecuada para el proyecto en caso de no contar con una ya establecida, dado que en este caso ya existe se agregaron sus características (**Figura. 96**).

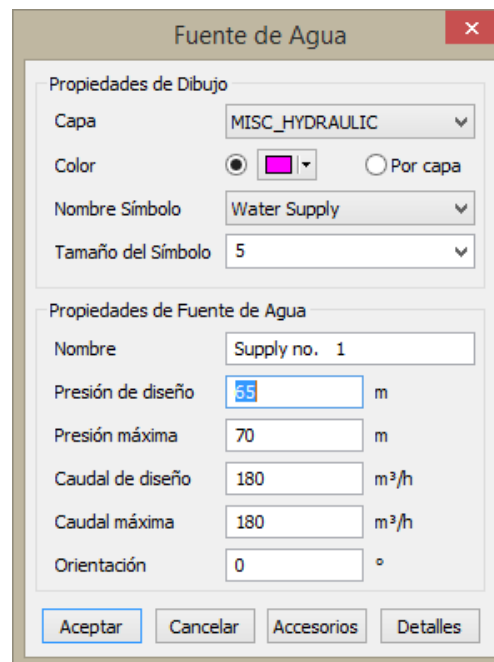


Figura 96. Parámetros de la fuente de abastecimiento

Ya conectada la tubería principal a la fuente de abastecimiento fue necesario conectar las valvulas de control de los bloques de riego, utilizando la herramienta

Herramientas/Conectar Válvulas, automáticamente el programa conecto las válvulas de control a la tubería principal (**Figura. 97**) y se comprobó la conexión de todas las tuberías con ayuda de la herramienta *Diseño/Comprobar Conexiones de Salida*.

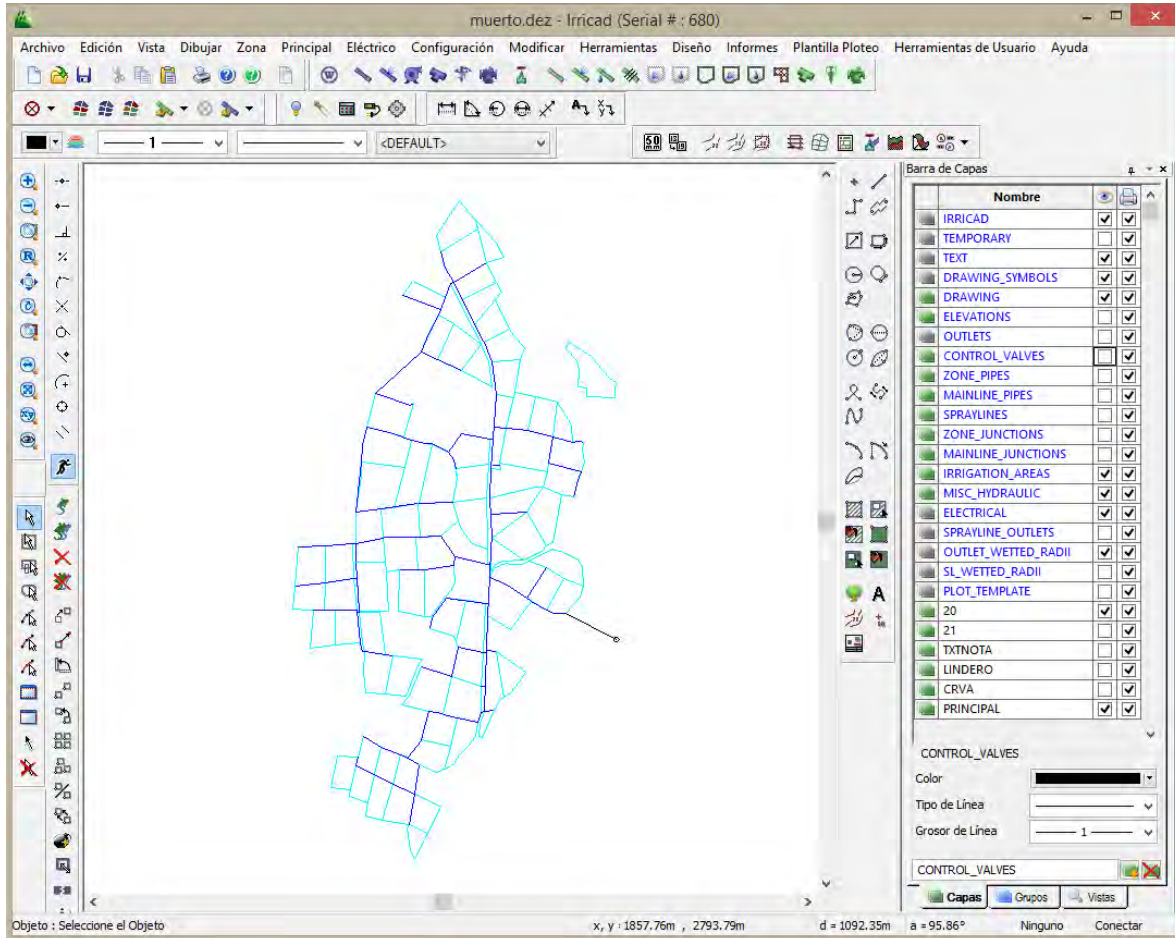


Figura 97. Red principal, fuente de abastecimiento y conexión de válvulas

Gestión y Diseño

Se fijó una velocidad máxima permisible de 2.0 m/s para determinar el diámetro de la tubería secundaria y principal y mediante la herramienta *Diseño/Análisis LP* (Figura 98) se realizó el diseño automático de diámetros.

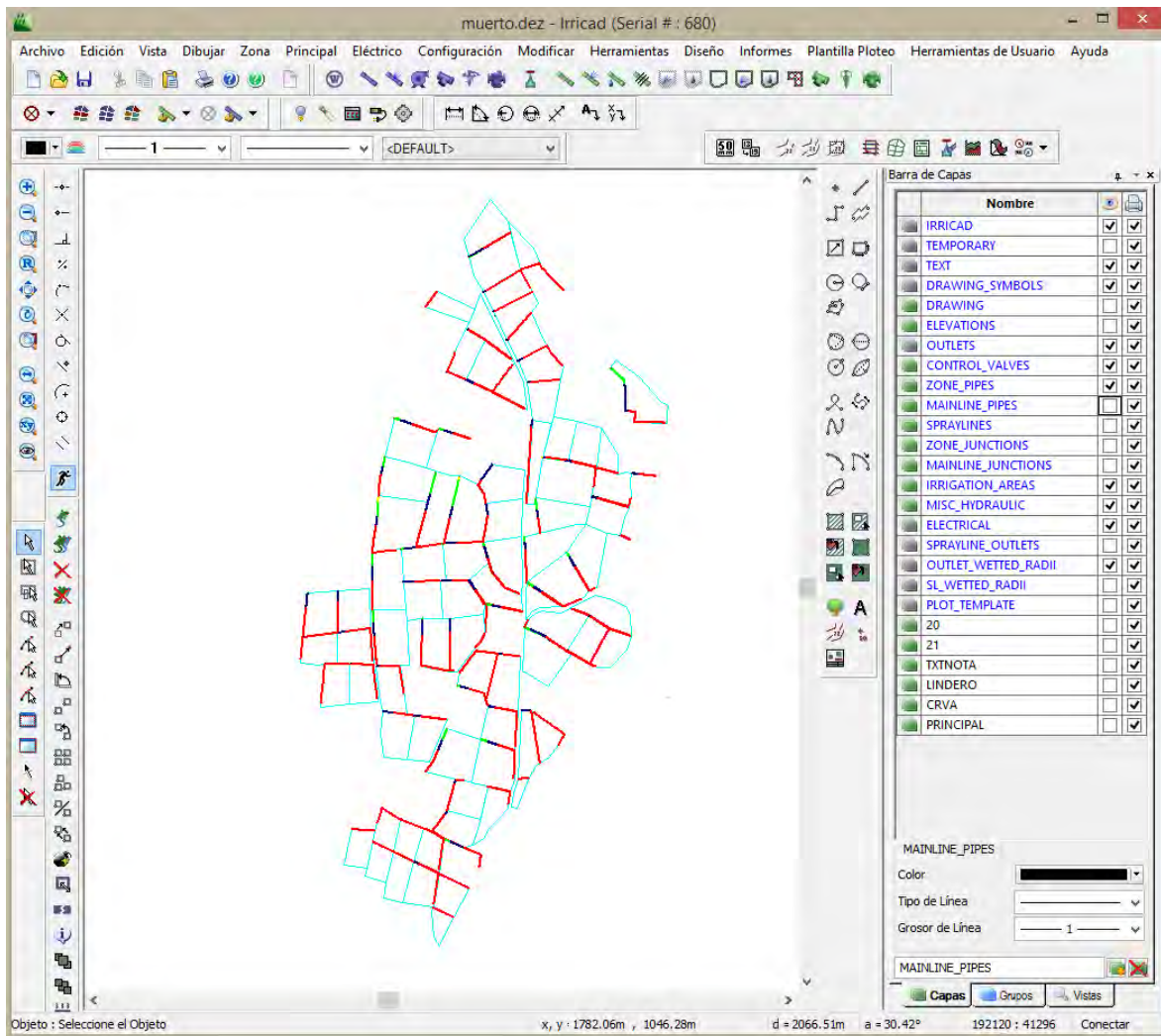


Figura 98. Optimización de tubería secundaria

Se verificó que la válvula de control fuera adecuada para el bloque de riego mediante la herramienta *Diseño/Especificaciones de Válvulas* (Figura 99), en la Figura 100 se indica la relación de pérdida de carga-gasto para las válvulas Nelson selenoid, en el diseño actual se utilizó la de 2" la cual no excede una pérdida de carga de 1 metro de columna de agua.

Resumen de Especificaciones de la Válvula

Nombre de la Zona	Tipo de Válvula	Mín Caudal (m ³ /h)	Caudal Max (m ³ /h)	Caudal de Zona (m ³ /h)
Area no. 6	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	18.17
Area no. 7	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	15.03
Area no. 8	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	14.10
Area no. 11	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	21.31
Area no. 12	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	18.19
Area no. 15	3" Nelson Solenoid Control Valve	11.35	181.70	34.94
Area no. 14	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	31.77
Area no. 16	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	22.56
Area no. 20	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	4.53
Area no. 21	2" Nelson Solenoid Control Valve	4.54	68.13	20.13

Lista de las válvulas adecuadas Lista de todas las válvulas

Figura 99. Especificaciones de válvula

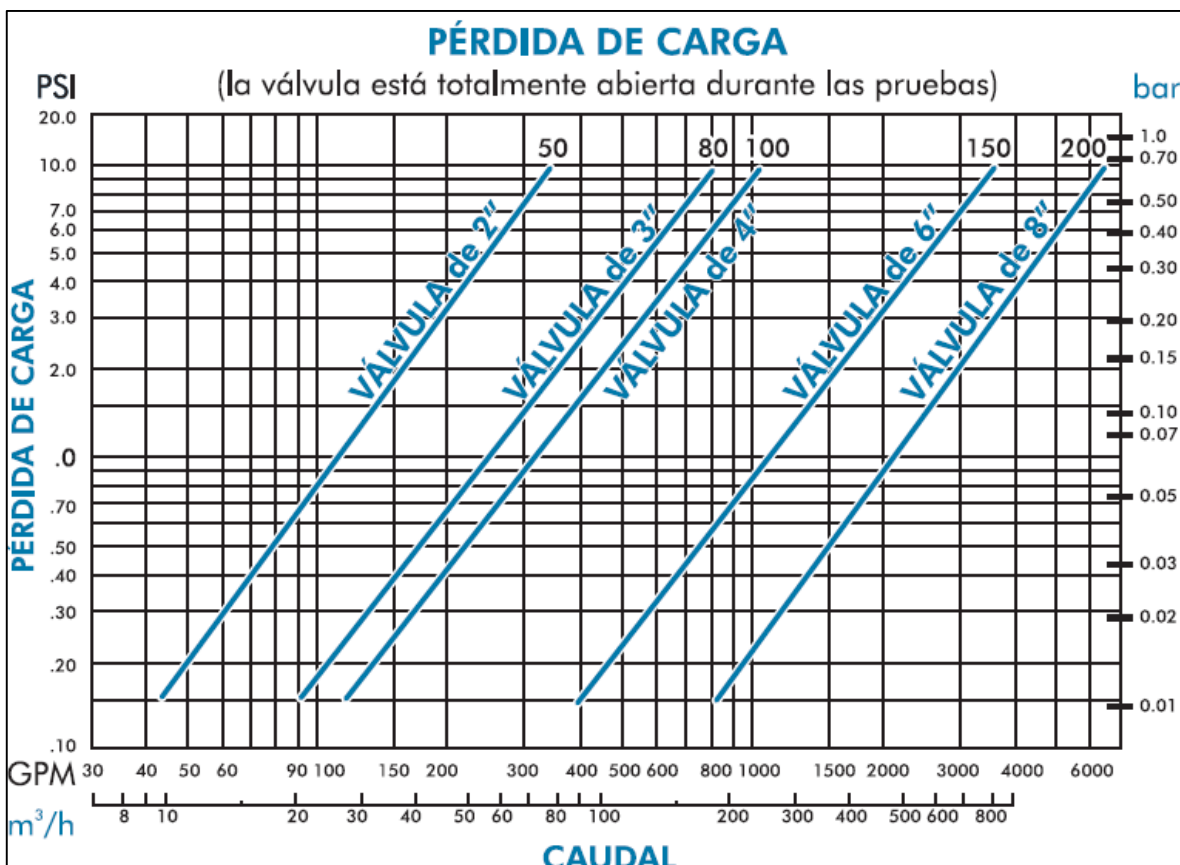


Figura 100. Perdida de carga-gasto para válvulas Nelson solenoid
 (Fuente: www.nelsonirrigation.com/media/general/CV8_SPANISH.pdf)

Se asignaron los turnos de riego para cada bloque, con la herramienta *Diseño/Asignar Turnados a Zonas*, el volumen máximo de gasto por bloque fue 180 m³/s el cual es el disponible (Figura 101).

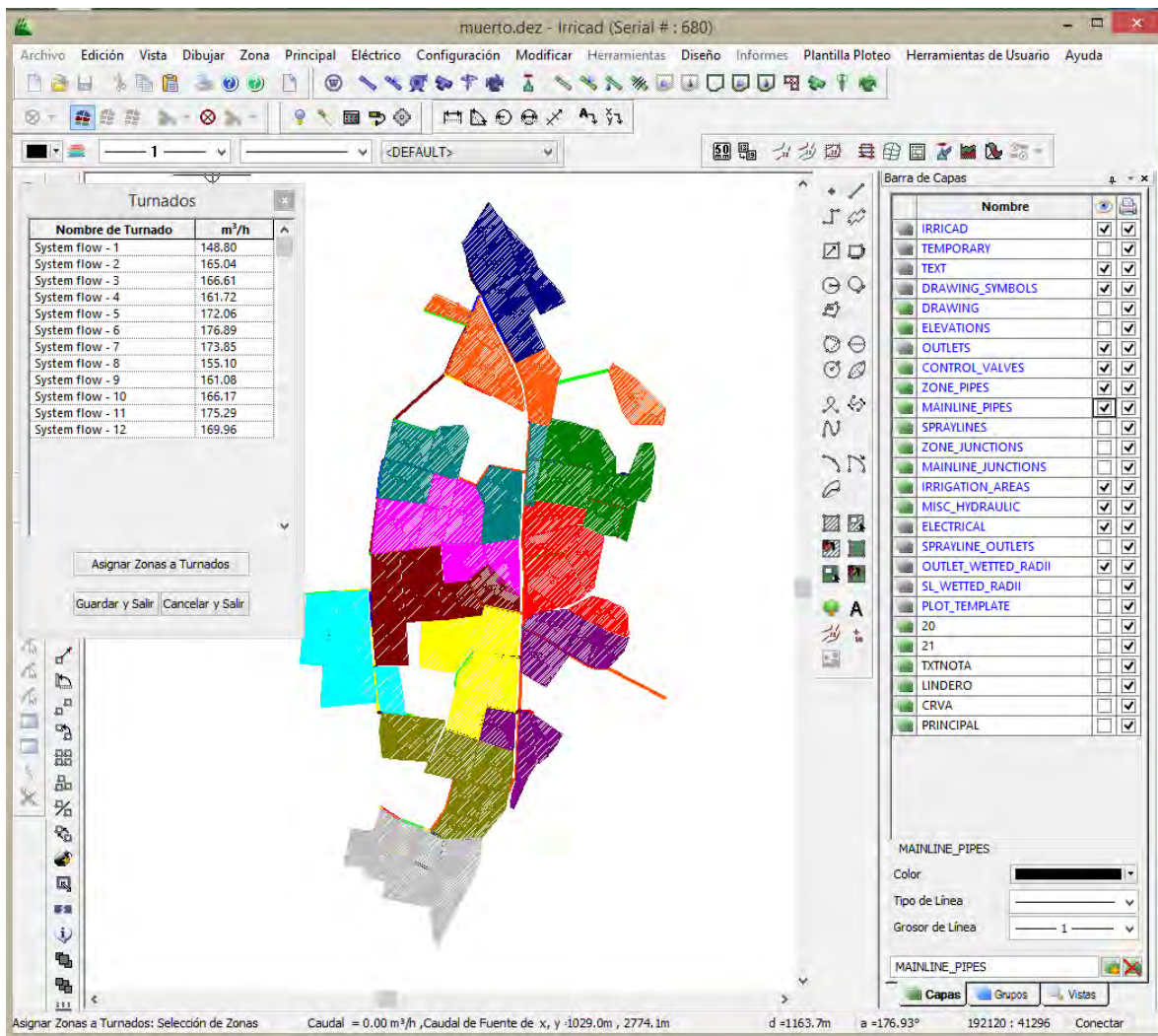


Figura 101. Turnos de riego

El siguiente paso fue diseñar los diámetros de la tubería principal automáticamente seleccionando la herramienta *Diseño/Análisis LP Principal* (Figura 102).

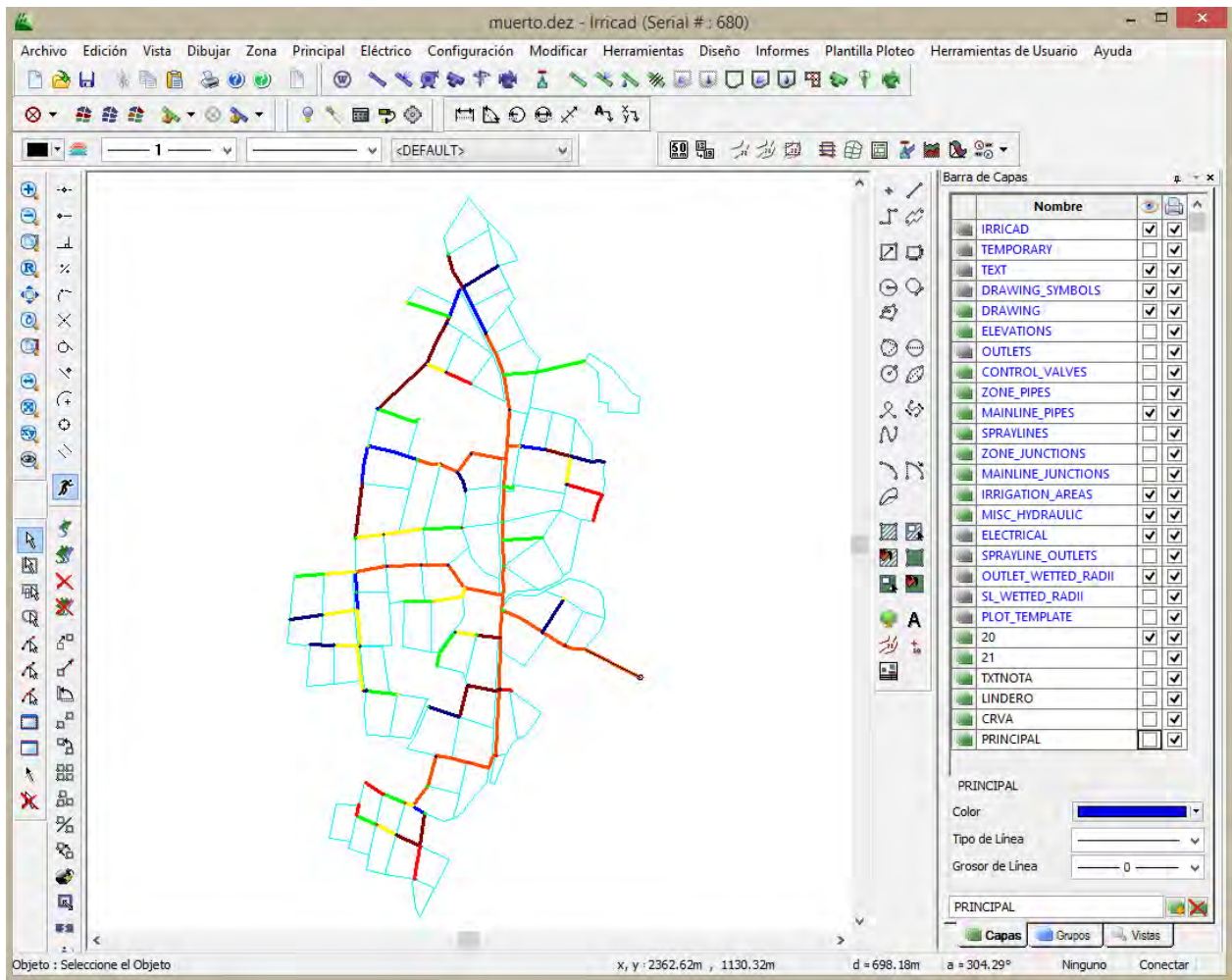


Figura 102. Optimización de tubería principal

Imprimir planos e informes del diseño

Se configuraron las etiquetas para bloques, tuberías y accesorios. Se generaron los reportes de presiones y velocidades en las tuberías como se muestra en la Figura 103, así como la compilación de materiales para cada bloque de riego (Figura 104). En la Figura 105 se muestra la compilación del total de material requerido en el diseño.

Zone Name : Area no. 1		Valve Description : 2" Nelson Solenoid Control Valve									
Zone Flow : 9.07 (m3/h)											
Zone Head (D/S) : 5.93 (U/S)		6.10		Valve Headloss: 0.17 (m)							
Run Type : LP Design											
Pipes											
	From		To				Flow 1	Flow 2	Max. Vel	Length	Headloss
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	Size (mm)	Code	(m3/h)	(m3/h)	(m/s)	(m)	(m)	
1505.5	1186.5	1505.0	1185.6	50.00	PVC	9.1	9.1	1.0	1.0	0.04	
1505.0	1185.6	1505.5	1185.4	50.00	PVC	9.1	9.1	1.0	0.5	-0.02	
1505.5	1185.4	1506.4	1184.9	50.00	PVC	9.0	9.0	1.0	1.0	-0.1	
1506.4	1184.9	1507.3	1184.5	50.00	PVC	9.0	9.0	1.0	1.0	-0.11	
1507.3	1184.5	1508.2	1184.1	50.00	PVC	8.9	8.9	1.0	1.0	-0.11	

Figura 103. Reporte hidráulico de los tramos de tubería.

Zone Name : Area no. 5			
Length/Number	Description	Unit Price	Price
117	2" Class 125 IPS SW PVC Pipe	1.15	134.57
3,883	Eurodrip PC2 Dripline 16MM/0.34GPH/12IN	0.00	0.00
1	2" Nelson Solenoid Control Valve	216.00	216.00
Total			350.57

Figura 104. Compilación de material por bloque de riego.

Design Summary						
Length/Number	Description	Unit Costs		Total Wholesale	Total Retail	Margin
		Wholesale	Retail			
4	12" Class 125 IPS SW PVC Pipe	32.80	32.80	149.29	149.29	0.00
477,218	Eurodrip PC2 Dripline 16MM/0.34GPH/12IN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7,251	2" Class 125 IPS SW PVC Pipe	1.15	1.15	8,324.98	8,324.98	0.00
1,785	2 1/2" Class 125 IPS SW PVC Pipe	1.67	1.67	2,985.99	2,985.99	0.00
1,580	3" Class 125 IPS SW PVC Pipe	2.46	2.46	3,887.94	3,887.94	0.00
895	4" Class 125 IPS SW PVC Pipe	3.94	3.94	3,522.99	3,522.99	0.00
883	5" Class 125 IPS SW PVC Pipe	6.23	6.23	5,509.02	5,509.02	0.00
557	6" Class 125 IPS SW PVC Pipe	8.86	8.86	4,937.46	4,937.46	0.00
2,206	8" Class 125 IPS SW PVC Pipe	15.09	15.09	33,291.73	33,291.73	0.00
12	10" Class 125 IPS SW PVC Pipe	23.29	23.29	297.09	297.09	0.00
59	2" Nelson Solenoid Control Valve	180.00	216.00	10,620.00	12,744.00	2,124.00
25	3" Nelson Solenoid Control Valve	410.00	492.00	10,250.00	12,300.00	2,050.00
0	*** NO PIPE SELECTED ***	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 105. Compilación de material del proyecto

En la Figura 106 se muestra la distribución de presiones en un bloque de riego, la mínima presión en el bloque es de 6.6 m de columna de agua.

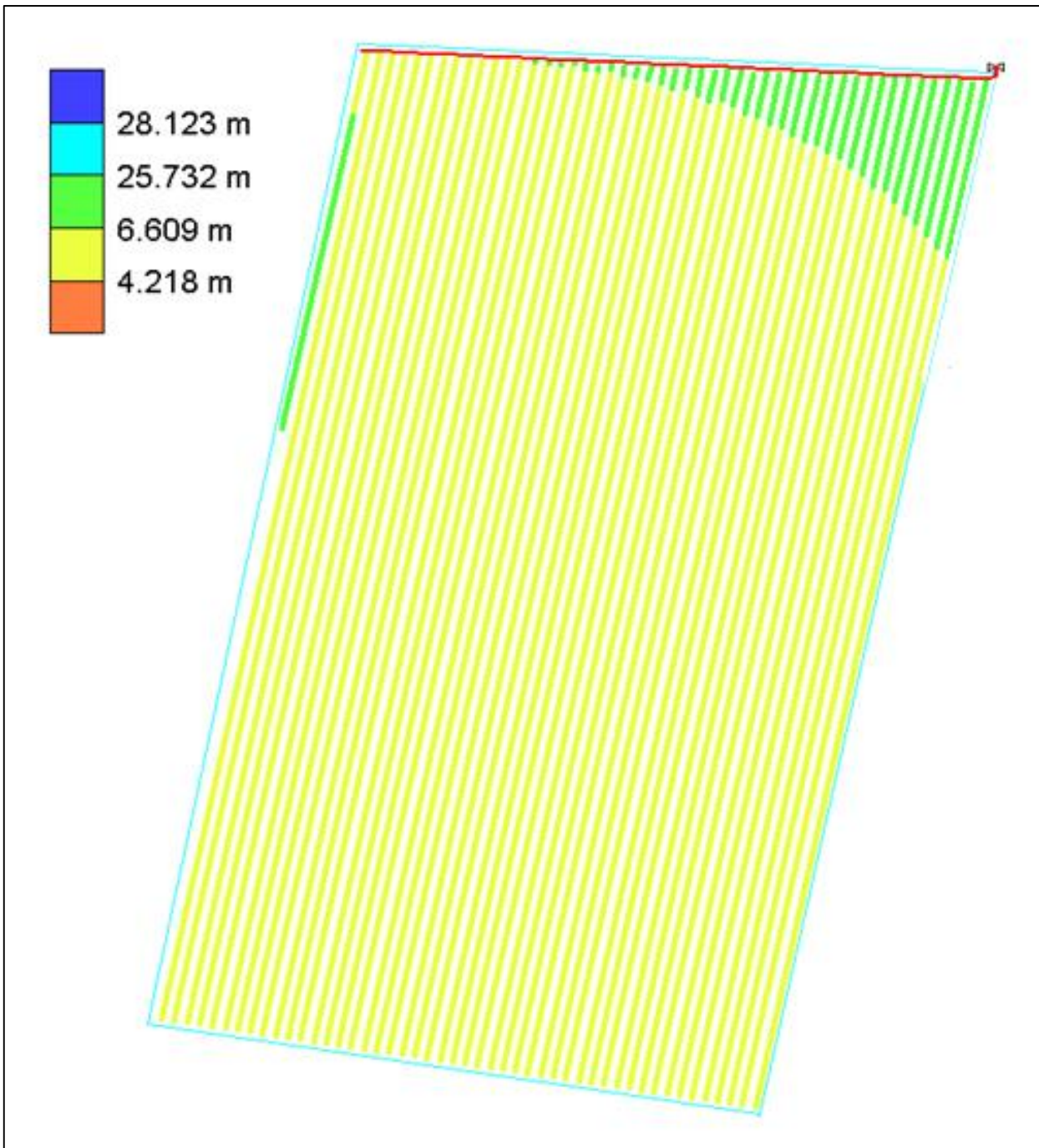


Figura 106. Distribución de presiones en bloque de riego.

La Figura 107 muestra la distribución de los gastos de los goteros en un bloque de riego, el gasto mínimo supera 1.23 l/h, la variación de gastos es debido a la variación de presiones como se mostró en la imagen anterior.

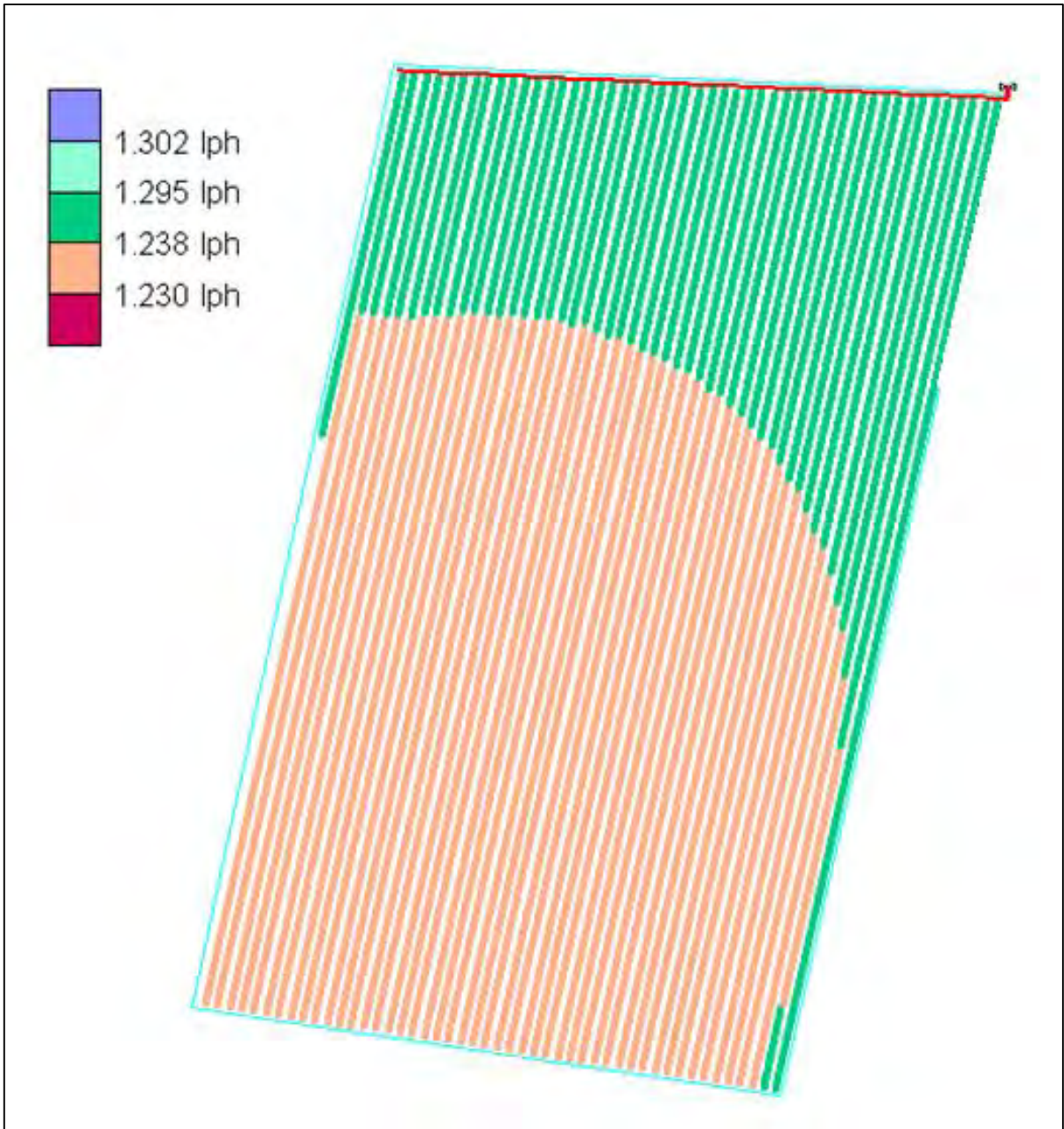


Figura 107. Variación de gasto en un bloque de riego

La Figura 108 muestra el gradiente hidráulico de la tubería secundaria para un bloque de riego, la línea azul muestra el límite máximo de presión que resiste la tubería utilizada, la roja el mínimo límite de presión y el gradiente de presión de la tubería diseñada se muestra por la línea verde, azul y roja, el cual está dentro de los límites.

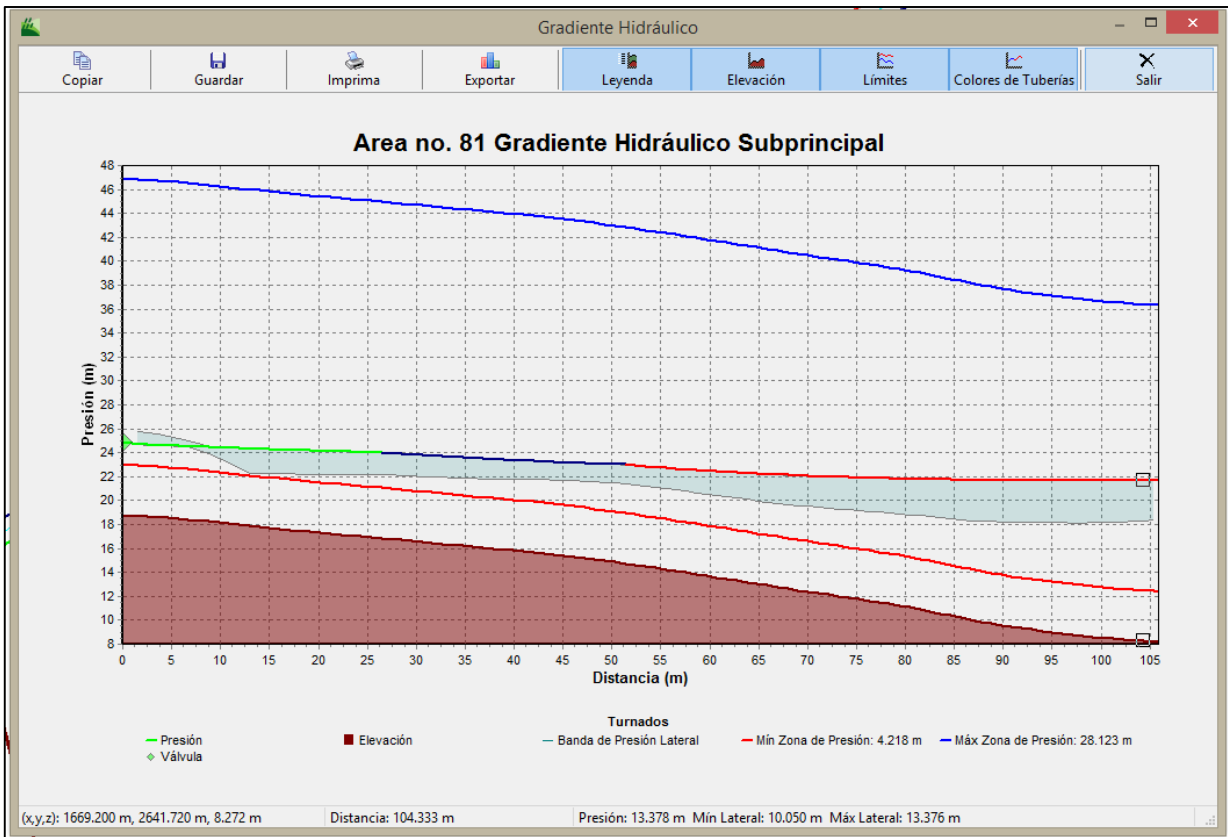


Figura 108. Gradiente hidráulico de la tubería secundaria.

En la Figura 109 se muestra el gradiente hidráulico de un tramo de la tubería principal, para el caso donde se encuentran funcionando todos los turnos de riego.

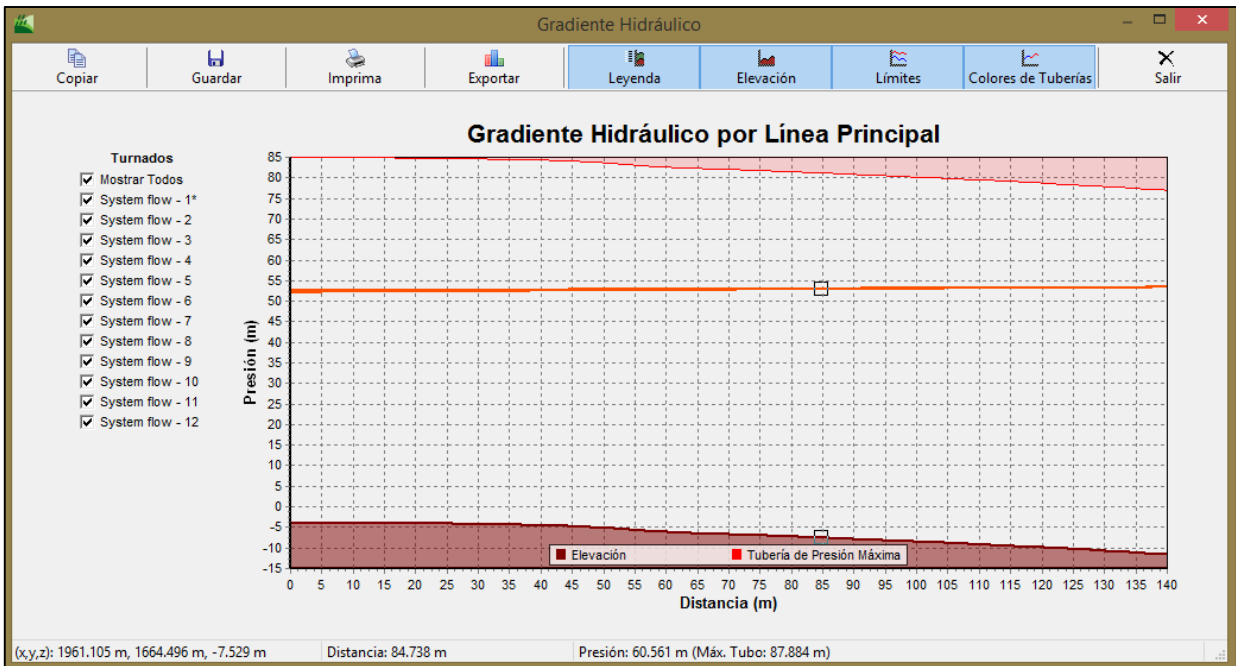


Figura 109. Gradiente hidráulico de la red principal

B2. Diseño del sistema de riego usando WCADI

Iniciar el proyecto

Según el diseño agronomico y el proyecto tipo se tienen los siguientes datos:

- Espaciamiento entre plantas: 0.30 m.
- Espaciamiento entre surcos: 1.0 m
- Cantidad de sectores de riego: 13
- Tipo de sistema: Cinta de goteo
- Gasto requerido por c/gotero 1.26 l/h

Para comenzar un nuevo proyecto se ejecutó el programa WCADI, se creó un nuevo proyecto, al cual se le asignó un nombre y una ruta de guardado.

El siguiente fue ingresar los datos generales del proyecto como se muestra en la Figura 110, a esta opción se ingresó en el menú "Proyecto" - "Datos Generales", donde no fue necesario llenar todos los campos, solo los indispensables para el diseño del proyecto, los cuales son: 01) escala de planos del proyecto, 02) unidades utilizadas, 04) base de datos del proyecto y 18) cálculo de EU; para el diseño del sistema de riego del presente trabajo, se eligió una escala de digitalización del mil, se trabajó en el SI, y los materiales se obtuvieron de la base de datos "WCNMX" la cual contiene archivos de tuberías, emisores, y diversos accesorios necesarios para proyectos de riego de algunas de las principales marcas comerciales, los cuales cumplen con los lineamientos de la norma mexicana para diseño de sistemas de riego presurizados.

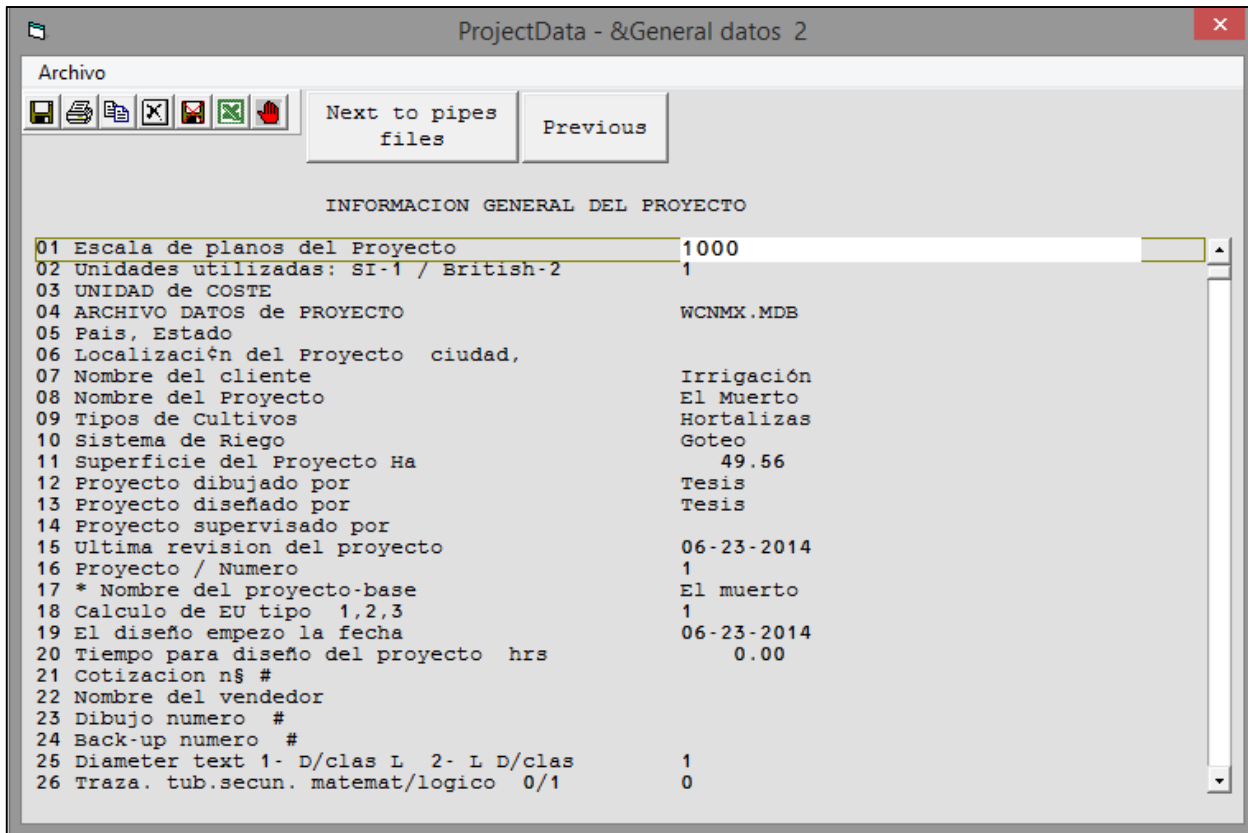


Figura 110. Datos generales del proyecto

Los materiales que el programa requirió para realizar el diseño fueron: tubería para red principal, tubería para red secundaria, y el tipo de emisor (para el caso de la cinta de goteo fue necesario agregar un archivo de tubería lateral y los emisores por separado).

En el presente proyecto se seleccionó tubería de 250, 200, 160, 100, y 75 mm, para la red principal, diámetros de 100, 75, 50, y 32 mm para la tubería secundaria (Figura 111) y tubería de 17 mm la cual corresponde a la cinta de goteo. Estos archivos de tuberías se importaron de la base de datos anteriormente mencionada. Cada tubería contiene información necesaria para el diseño como; coeficientes para calcular pérdidas de carga por el método de Hazen-Williams y el de Darcy Weisbach, velocidad máxima, coste por metro lineal, entre otros para su clasificación dentro de la base de datos.

IMOF4 - Archivos tuberías 7

Archivo Selec

Next to emitters
file

DIAMETROS Y COSTES DE TUBOS

DPV4

Precio unitario : 0.00 m

#	0-2	Interior mm	Nominal mm	Precio (/m)	Coef	D	W a	D W b	D W c	Kd	Espesor mm	Vmin m/sec	Vmax m/sec	Unid	Clase	PW (#)	Pen
01	1	39.20	32.000	.31	145	8.288	1.760	4.760	0.000	1.50	0.0	2.0	1	4	.40	3	
02	1	56.50	50.000	.55	145	8.288	1.760	4.760	0.000	1.90	0.0	2.0	1	4	.40	1	
03	1	84.90	75.000	.87	145	8.288	1.760	4.760	0.000	2.00	0.0	2.0	1	4	.40	5	
04	1	109.90	100.000	1.23	145	8.288	1.760	4.760	0.000	2.20	0.0	2.0	1	4	.40	4	

Cat logo Descripcien

TRRIEGO"II0I360----- TUBO"HID:"IRRIG"C7B"32"MM-----

Figura 111. Tubería para diseño de red secundaria

Según el diseño agronómico del proyecto tipo se requieren goteros de 1.27 l/h, el gotero que se aproxima a este requerimiento es la cinta comercial "Turbo Slim" de la marca JAIN (Figura 112) la cual nos da 1.3 l/h con una carga de 10.2 metros de columna de agua.

IMOF4 - Archivos tuberías 7

Archivo Selec

Next to emitters
file

DIAMETROS Y COSTES DE TUBOS

DPP2

Precio unitario : 0.00 m

#	0-2	Interior mm	Nominal mm	Precio (/m)	Coef	D	W a	D W b	D W c	Kd	Espesor mm	Vmin m/sec	Vmax m/sec	Unid	Clase	PW (#)	Pen
01	1	16.10	16.400	1.50	150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.15	0.0	2.0	1	2	.25	5

Cat logo Descripcien

TTSLIM"500-----

Figura 112. Cinta de goteo para diseño de laterales

Importar información de AUTOCAD

El programa requiere la topografía del proyecto, la cual tiene que abarcar la totalidad del área de diseño, de no ser así el programa no permite trabajar en zonas que se encuentren fuera de las curvas de nivel.

WCADI diversifica el área del proyecto en tres clasificaciones: área total del proyecto (es la extensión de terreno la cual se va regar con una misma fuente de abastecimiento), subárea (segundo nivel de división del área, puede tener objeto por diferentes propietarios, diferentes cultivos, etc.) y bloques (nivel mínimo de división del área, cada bloque tiene una válvula de riego individual). Cuando una subárea contenga dos o más bloques estos no podrán tener diferentes arreglos de plantación, de lo contrario, pueden tener diferentes direcciones de riego.

El programa permite ingresar el área total del proyecto sin que tenga divisiones, una vez en la plataforma de WCADI puede dividirse en subáreas y a la vez estas

en bloques según sea el caso requerido. Debido a que el programa no presenta herramientas de fácil manipulación para estas actividades es conveniente ingresar las áreas, subáreas y si es conveniente bloques desde AutoCAD o algún otro editor planos en formato "DXF", aunado a que generalmente cuando se realiza un proyecto ya se tienen establecidas las parcelas las cuales se digitalizan mediante un levantamiento topográfico.

Para el presente proyecto se ingresó la división parcelaria hasta el nivel de bloques de riego (Figura 113), con el objeto de facilitar y disminuir los tiempos de diseño en el programa WCADI. El terreno presenta topografías con pendientes altas, el emisor que se utilizó no es autocompensado, por lo que las parcelas (subáreas) con extensiones mayores a 1 ha, se dividieron, con el fin de tener un mayor control en las presiones y mejorar la uniformidad de aplicación del riego.

La información de parcelas y topografía se ingresó mediante la herramienta "Importar DXF" previamente en AutoCAD se identificaron las capas que corresponden a topografías, parcelas, etc. WCADI muestra una ventana donde se discriminan cada una de las capas que contiene el archivo DXF como se muestra en la (Figura 114).



Figura 113. Bloques de riego y topografía

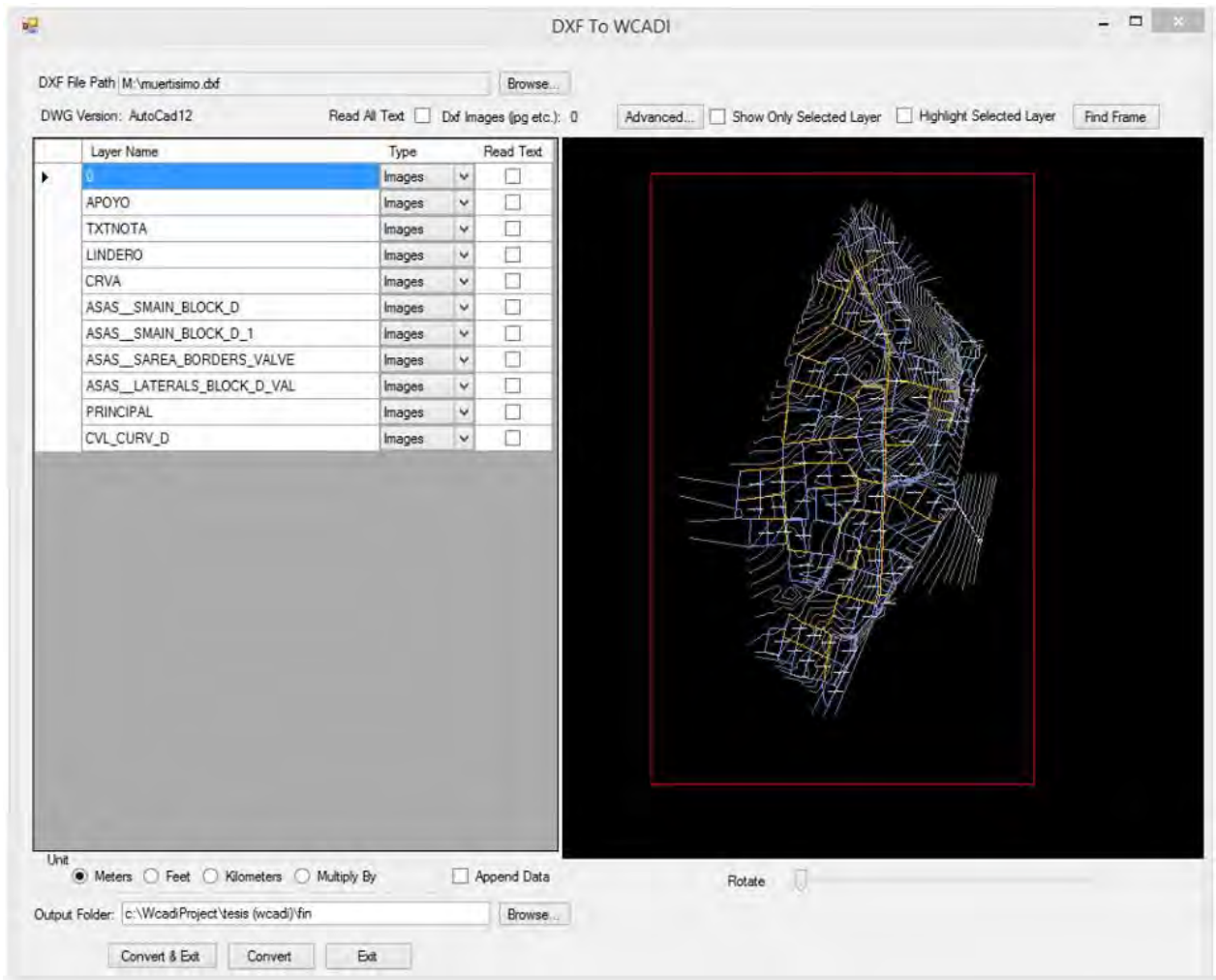


Figura 114. Importación de información de AutoCAD

El programa WCADI calcula las elevaciones por medio de las curvas de nivel, y para realizar esta acción fue necesario ejecutar el comando "Retículo", donde el programa generó una cuadrícula para interpolar las curvas de nivel y obtener coordenadas X, Y y Z en cualquier punto del área del proyecto.

Diseño de bloques de riego

Finalizado el ingreso de información topográfica y de parcelas (Figura 115), se procedió al diseño de bloques, en el caso del proyecto actual las parcelas ya se ingresaron divididas a nivel de bloques, por lo que solo se configuró los parámetros necesarios para el diseño de la tubería secundaria.

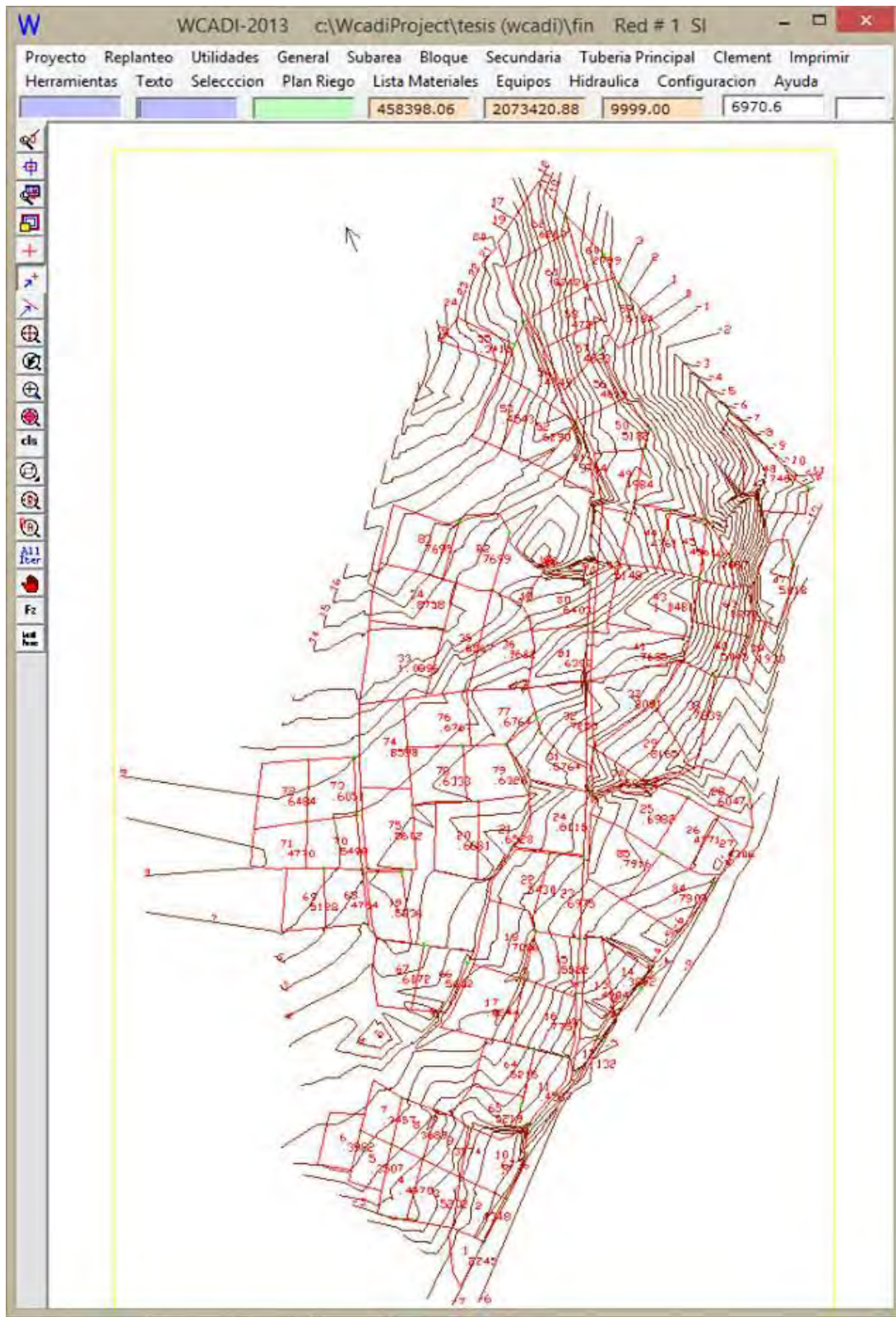


Figura 115. Curvas de nivel y bloques de riego en la plataforma grafica de WCADI

Se indicaron los parámetros de las subáreas como se muestra en la Figura 116, la

dirección de riego se ingresó gráficamente y los parámetros de diseño como marco de plantación, nombre del cultivo, número de laterales por hilera, etc. se ingresaron directamente por medio de tablas.

DATOS PARA S/area # : 6		Serie 1	Serie 2
		Separa #	Separa #on
01	Separacion entre plantas m	.3	0 0.00 0
02	(para una 2a serie) m	0.00	0 0.00 0
03	Separacion entre hileras m	1.00	0 0.00 0
04	Separacion entre emisores m	.30	0 0.00 0
05	(para una 2° serie) m	0.00	0 0.00 0
06	Separacion entre laterales m	1.00	0 0.00 0
07	Dist de borde de Subarea a 1ra planta m	.15	0
08	Dist de borde de Subarea a 1ra hilera m	.50	
09	Dist de borde de Subarea a 1er emisor m	.15	0
10	Dist de borde de Subarea a 1er Lateral m	.50	
11	Numero lineas plantas en Subarea	0	
12	N° de Laterales para cada hilera	1.00	
13	Nombre de Subarea	6	
14	Nombre del cultivo	hortali	
15	Conjunto emisor tipo		
16	Conjunto Secundaria / Lateral tipo		
17	Nombre conjunto acople		
18	Nombre conjunto reductor		
19	Catalogo emisores para cortavientos		
20	separacion emisores para cortavientos m	0.00	
21	Necesita division 1-Si,0 -No	0	
22	Division automatica 1-Si,0 -No	0	
23	Dividir por: Ancho, n° hileras, partes iguales 0-3	0	
24	1- Ancho de la division m	0.0	
25	Ancho Calle m	0.0	
26	2- N° de lineas en division	0	
27	Ancho calle # lineas	0	
28	3- N° de divisiones	0.000	
29	Division en el otro sentido (long. lateral)	0	
30	1- Ancho de la division m	0.0	
31	Ancho Calle m	0.0	
32	Salvar automaticamente 1-Si,0 -No	0	
33	Area minima a salvar en division automatica Ha	0.00	
34	Bloque igual a la subarea 1-Si,0 -No	1	
35	Color plantas No 1 - 255	1	
36	Dibujar plantas 1-Todas,2-Lineas 1/2	1	
37	Que linea de plantas 0,1,2,#	1	
38	Que planta en la linea 0,1,2,#	1	
39	Simbolo plantas Serie 1 ,+, .	.	
40	Simbolo plantas Serie 2 ,+, .	.	
41	Emisor diametro m	0.0	
42	Evaporacion Equivalente mm/dia	0.0	
43	Ciclo riego dias	0	
44	Intervalo Riego dias	0	
45	Numero de plantas series 1	0	
46	Numero de plantas series 2	0	

Figura 116. Parametros de diseño para subareas de riego

Finalizado el ingreso de parámetros en las subáreas se introdujeron los datos de bloques. Los parámetros 3 y 4 de la Figura 117 indican la presión mínima y máxima

del bloque, esta se calcula por medio de iteraciones, el programa indica el porcentaje de variación de gasto que resulta según ingresamos valores. En este caso se buscaron valores de manera que se conservara lo más próximo a una variación del 10% del gasto en el bloque. En este apartado también se indicó al programa con cuál de los archivos de materiales creados anteriormente diseñara los laterales y las tuberías secundarias. En el parámetro 24 y 25 se especificó la posición en la cual se colocó la válvula de control para cada uno de los bloques.

PARAMETROS DE BLOQUES PARA SUBAREA : 1 Bloque : 1	
01 PRESION	: Control en entrada lateral (m) 0
02	: * trabajo en Valvula (m) 11.47
03	: * minima en el bloque (m) 10.20
04	: * Maxima en el bloque (m) 12.40
05	: min. a lo largo de Secundaria (m) 0.00
06 SECUNDARIA	: Caudal a añadir m ³ /h 0.00
07	: * archivo de tuberia para diseño DPV4
08	: Calc. Perdida Carga por : HW-1; HL-2 1
09	: * Diametro minimo (mm) 32.000
10	: * Diametro Maximo (mm) 100.000
11	: Velocidad minima (m/sec) 0.00
12	: Velocidad Maxima (m/sec) 2.00
13 LATERALES	: * Archivo de tuberia para diseño DPP2
14	: Calc. Perdida Carga por : HW-1; HL-2 1
15	: * Diametro minimo (mm) 16.400
16	: * Diametro Maximo (mm) 16.400
17	: Velocidad minima (m/sec) 0.00
18	: Velocidad Maxima (m/sec) 2.00
19	: Long. min. de un mismo diametro (m) 1.00
20	: long. min. de un mismo diame. secundaria (m) 12.00
21 EMISORES	: * archivo (catalogo) para diseño ETSLIM 500
22	: para otra posible serie
23	: Ubique valvula entre Laterales 0,1/2,1/3,1/4,1/5,n 200.00
24	: Ubique Secunda en Laterales 0,1/2,1/3,1/4,1/5,n (m) 0.00
25	: El bloque esta operando en la red 1
26	: El bloque opera en el Turno No # 0
27	: Presion entrada a PRV (reductor presion) en secun. (m) 0.00
28	: Presion salida desde PRV a lo largo secundaria (m) 0.00
29	: Aumentar caudal Emisor en un % 0.00
30	: Minima longitud de lateral (m) 1.00
31	: No de laterales abiertos para limpieza 0
32	: Presion entrada a PRV a lo largo lateral (m) 0.00
33	: Presion salida desde PRV a lo largo de lateral (m) 0.00
34	: Calc. local. val.:0-Calc, 1-El mas alto ,2-Min. Pres 1
35	: Velocidad de limpieza en lateral (m/sec) 0.00
36	: Escribir Indice del lateral 0/1 1
37	: Dibujar Secundaria 0/1 1
38	: Texto Secundaria 0,1,2,3,4 1
39	: Dibujar lateral: Todos 0,1,2, 10

Figura 117. Parámetros de diseño para bloques de riego

Se fijó la dirección para los laterales (Figura 118) así como para la plantación, es conveniente que los laterales o el surcado se diseñen con surcos al contorno de la pendiente, para evitar erosión y promover la infiltración del agua en el suelo.

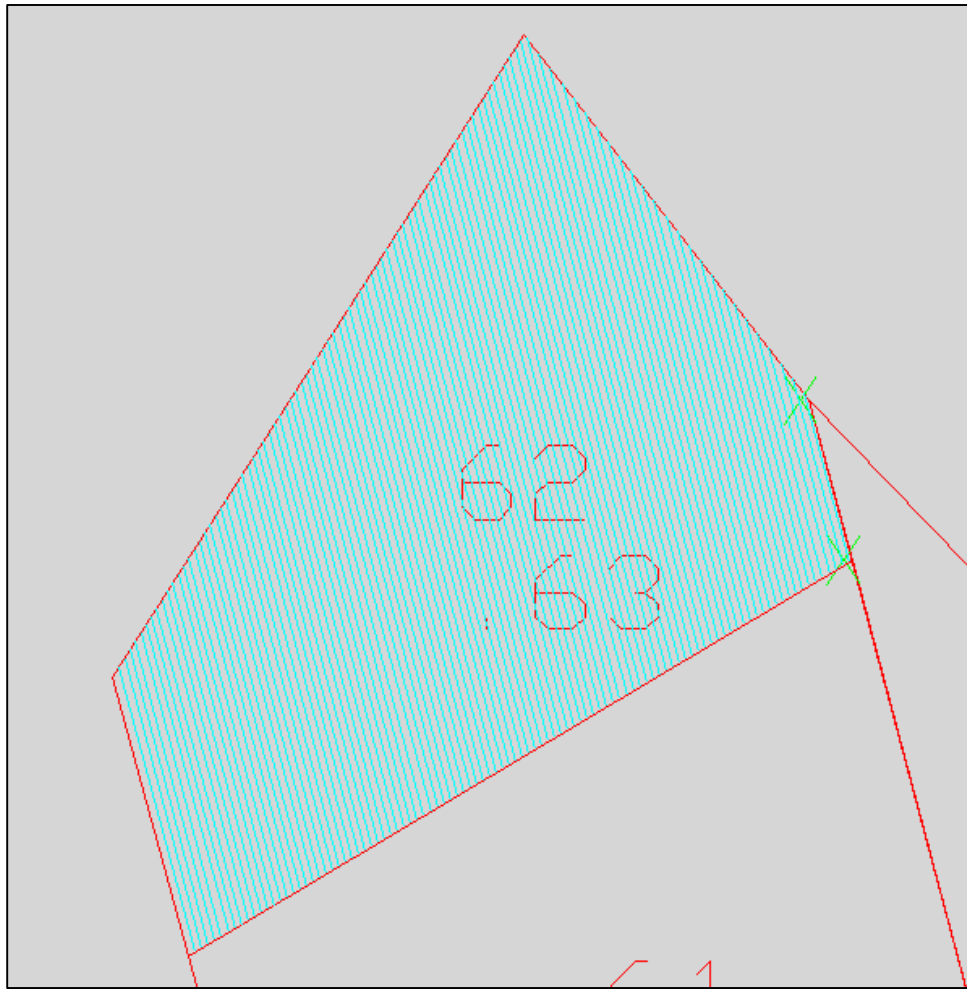


Figura 118. Laterales de riego en un bloque

Diseño de la tubería secundaria

La tubería secundaria tiene el fin de transportar el agua de la tubería principal a los laterales de riego, utilizando válvulas de control en la conexión de las mismas. El cálculo de la tubería secundaria en el presente proyecto se calculó por el método de "parámetros" los cuales ya se tenían definidos anteriormente. Una vez que la tubería y la válvula se encuentran en el lugar deseado, se procedió al diseño de diámetros.

En la Figura 119 se observa el diseño de la tubería secundaria donde se incorporan tres diferentes diámetros.

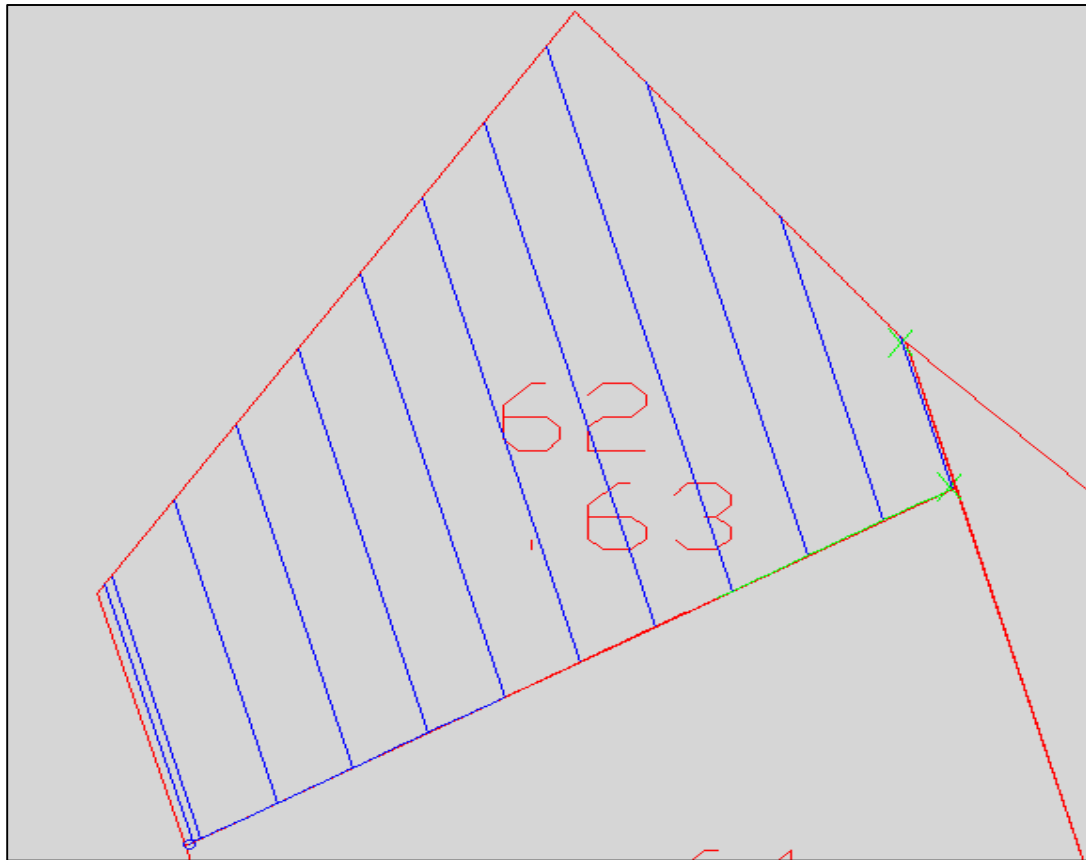


Figura 119. Diseño de tubería secundaria

Diseño de tuberías principales

La tubería principal es proceso más complejo del diseño, debido a que se presentan diversas posibilidades de arreglos y se debe lograr el más óptimo en función de los parámetros hidráulicos que intervienen en el proceso.

La primera operación para el cálculo de la tubería principal fue ingresar los parámetros de diseño para el proyecto Figura 120, en el punto 1 se muestra el número de nodos calculado automáticamente por el programa, los cuales incluyen válvulas y bifurcaciones. El parámetro 2 indica el número de turnos, estos se definieron dividiendo el gasto total del sistema entre el gasto disponible. Se indicó al programa que optimizara el diseño en función de las presiones debido a que ya se tenía una bomba instalada en el proyecto. Las pérdidas de carga propuestas fueron de 1 m en cada válvula y 5 m en la filtración. En el parámetro 10 se indicó que todas las válvulas se convirtieran a nodos y se utilizó la fórmula de hazen-williams para el cálculo de las pérdidas de carga.

Table of mainpipe parameters for all case's

01	1	Numero de nudos	1
02	2	Numero de turnos	93
03	3	Limite de velocidad segun tabla tramos 0 archv tubs 1	0
04	4	Turnos Calc Demanda de : 0-nudos,1-bloques	1
05	5	Ordenar diametros en el ramal? N-0,S-1	0
06	6	Optimizar segun presiones 0 o s/ coste energetico 1	0
07	7	Perdida de Carga p/filtraci3n (m)	5.00
08	8	Perdida de Carga en Valvula ctrl (m)	1.00
09	9	Porcentage de caudal a a1adir durante la optimizacion %	0.00
10	10	Todas las valvulas de Blq como nudos? N-0,S-1	1
11	11	Optimizacion tambien del timbraje de Tub? N-0,Y-1	0
12	12	Timb Tub por: presion, golpe ariete, pr estatica 0,1,2	0
13	13	Dise1o de red usando clement 0,1	0
14	14	Design network Hyzen Williams (0) Or Darcy Weis.(1) 0,1	0
15	15	Write nodes names (0) Or OriginalNodes name(1) 0,1	0

Figura 120. Parámetros de diseño tubería principal

Posteriormente de definir los parámetros de la tubería se ubicó la fuente de agua y los nodos donde se presentan bifurcaciones, esto no impide que una vez diseñados los tramos de tubería se puedan agregar más nodos. Los nodos también pueden ser cualquier otro punto de la red, donde se requiere un informe hidráulico.

El tercer paso fue la creación de los tramos de tubería (Figura 121), el programa puede trazarlos automáticamente o se pueden realizar de manera manual con un trazo propuesto por el usuario, en este caso el programa trazo el recorrido óptimo de la tubería en función de los parámetros hidráulicos.

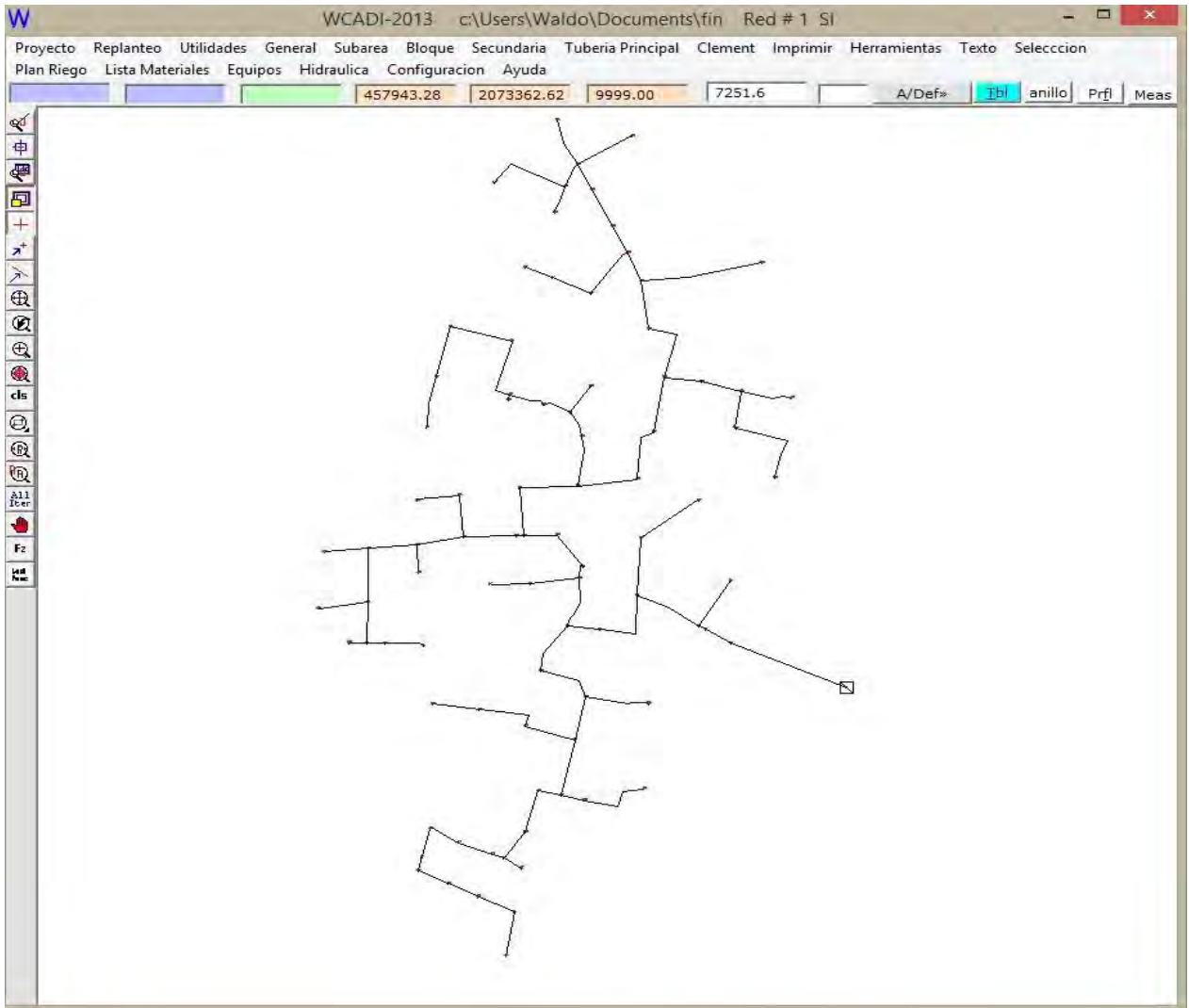


Figura 121. Tubería principal, nodos, válvulas y fuente de abastecimiento

WCADI cuenta con una herramienta Figura 122 que permitió saber si todos los nodos se encontraban conectados a la red principal.

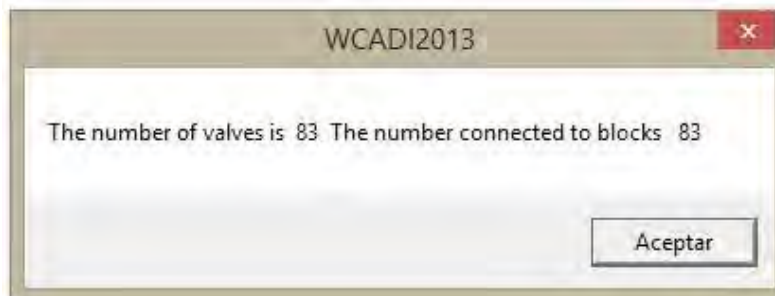


Figura 122. Confirmación de conexión de la tubería principal.

Posteriormente se definieron los turnos de riego en función del diseño de los bloques, el proyecto de tuvo un gasto de 637.8 l/s, como la fuente disponible tiene un gasto de 50 litros por segundo se definieron 13 turnos de riego. En el

submenú turnos de riego se seleccionaron grupos de bloques sin que estos rebasaran el gasto disponible en la fuente. En la Figura 123 se observan los turnos de riego ya definidos.

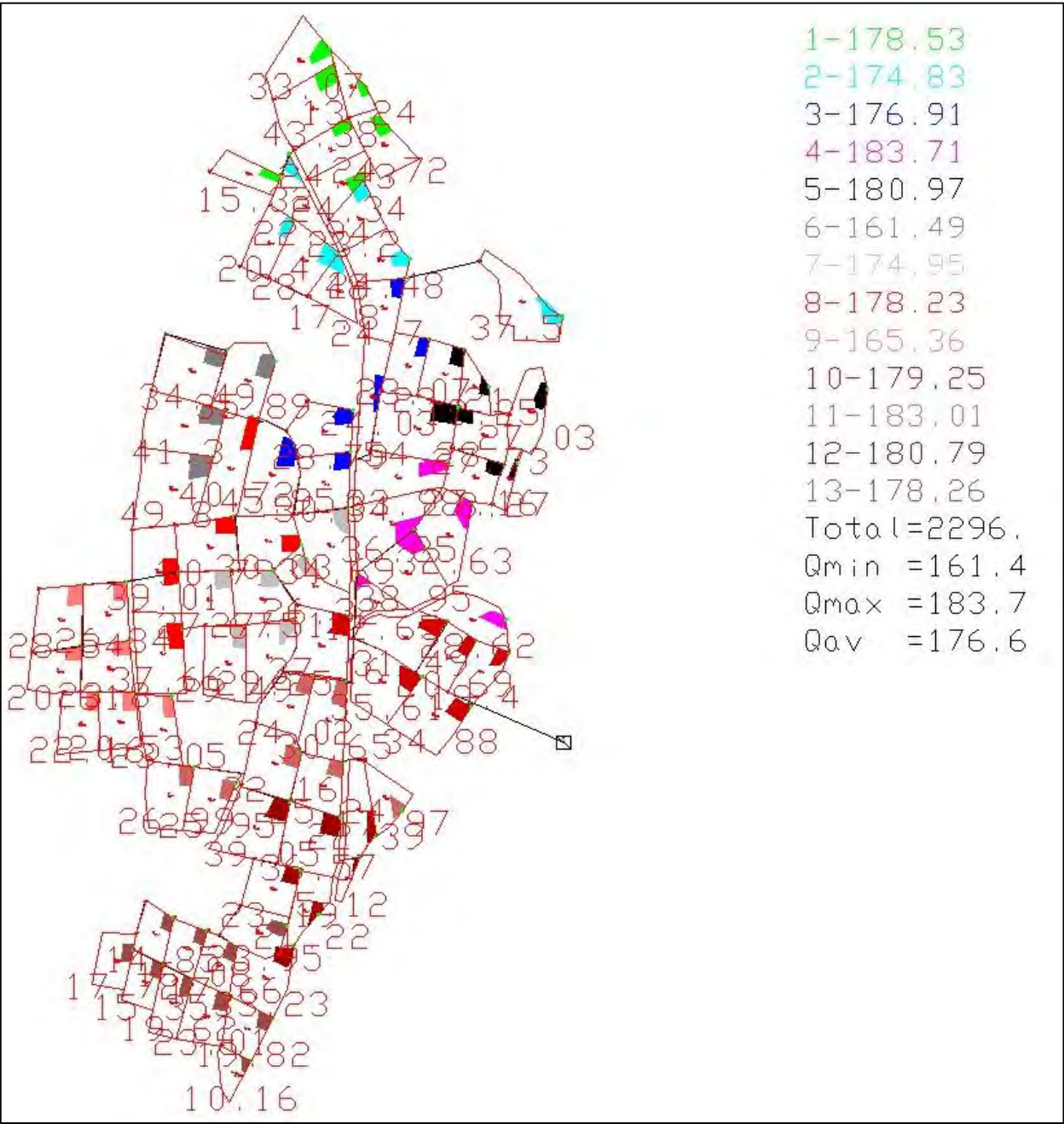


Figura 123. Turnos de riego

Se ingresó a la información de turnos de riego (Figura 124), para corroborar que los nodos se encontraran asignados a los turnos correspondientes

# Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01 A2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	0.0	0.0	0.0
02 A3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
03 A4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	0.0	0.0	0.0
04 A5	0.0	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
05 A6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	0.0	0.0	0.0
06 A7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0
07 A8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	0.0
08 A9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0
09 A10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10 A11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.6	0.0	0.0	0.0
11 A12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12 A13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13 A14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14 A15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15 A16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16 A17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17 A18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18 A19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0
19 A20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0
20 A21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 124. Información de turnos de riego

Se ingresó a la información de tramos de tubería principal (Figura 125) y se asignó a cada tramo el archivo de materiales definido anteriormente, se estableció un límite de velocidad de flujo en la tubería de 2m/s. la tabla muestra que nodos conectan cada tramo de tubería, así como el flujo que circula por ellos.

#	Tram Nombre	De	A	Arch de Tub	H L Factor	Di Nominal	Local (m)	Vmin (m/s)	Vmax (m/s)	Longi (m)	Opti No. 0-3	flow Pipes (m³/h)
01	A-1	A1	A2	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	187.5	1	183.68
02	A-2	A2	A3	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	44.2	0	183.68
03	A-3	A3	A4	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	11.7	0	183.68
04	A-4	A4	A5	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	89.5	0	28.62
05	A-5	A4	A6	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	105.0	0	182.98
06	A-6	A6	A7	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	1.1	0	182.98
07	A-7	A7	A8	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	118.3	0	182.98
08	A-8	A8	A9	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	48.2	0	180.93
09	A-9	A9	A10	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	85.5	0	180.93
10	A-10	A10	A11	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	28.2	0	180.93
11	A-11	A11	A12	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	64.4	0	180.93
12	A-12	A12	A13	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	61.5	0	180.93
13	A-13	A13	A14	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	77.9	0	165.33
14	A-14	A14	A15	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	70.7	0	69.80
15	A-15	A15	A16	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	67.1	0	39.01
16	A-16	A14	A17	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	70.9	0	165.33
17	A-17	A17	A18	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	46.2	0	37.66
18	A-18	A17	A19	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	72.9	0	165.33
19	A-19	A19	A20	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	66.2	0	28.34
20	A-20	A19	A21	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	90.3	0	110.15
21	A-21	A21	A22	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	68.1	0	65.74
22	A-22	A22	A23	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	26.0	0	22.16
23	A-23	A22	A24	DPV5	1.00	0.00	0.00	0.0	2.0	26.8	0	43.58

Figura 125. Información de tramos de tuberías

Se ingresó la información de la fuente de abastecimiento y el programa realizó el diseño automático de diámetros como se muestra en la Figura 126.

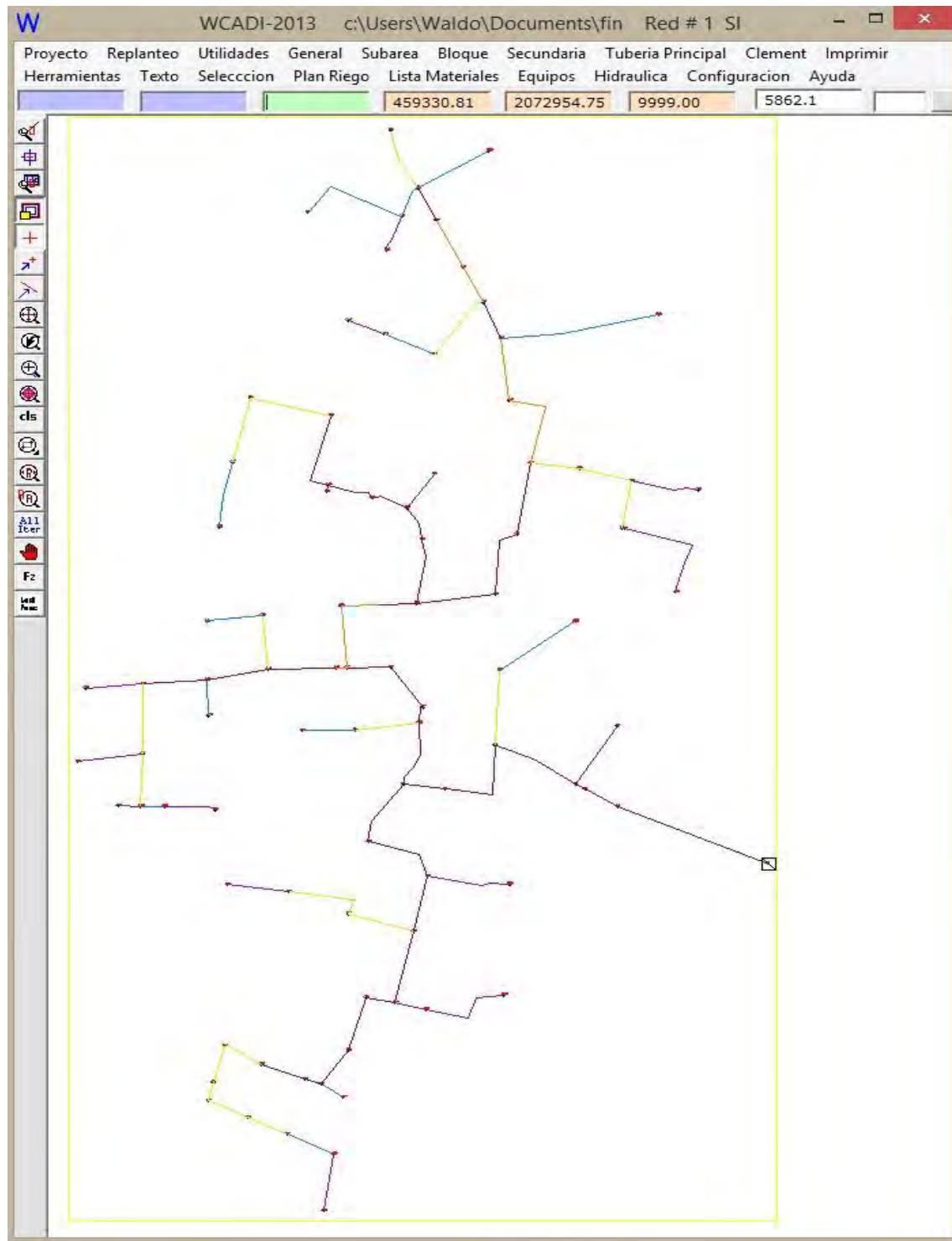


Figura 126. Diseño de diámetros de red principal

Impresión de informes y planos e importación de información a AutoCAD

Se generó el reporte de presión y velocidad para los tramos de tubería de la red principal como se muestra en la Figura 127, se generó una gráfica que muestra la distribución de presiones cuando se encuentran operando los turnos de riego

Figura 128 y se generó el reporte para la presión y gasto de todos los bloques de riego Figura 129.

Se generó la lista de material y se configuro la herramienta de impresión para exportar e imprimir los planos de tubería principal, bloques de riego y turnos de riego.

PRESIONES Y CAUDALES		Turno															
Nudo	Elevacion (m)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
A1	-12.00	Presion en bomba (m)	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	
		Filtrado a presion	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
		Presion despues filtracion	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	
A2	-2.97	Presion en nudo (m)	53.66	53.75	53.70	53.53	53.60	54.05	53.74	53.66	53.96	53.64	53.55	53.60	53.66		
		Presion requerida (m)													12.20		
		Operando en turno	0/1													1	
		Caudal en tramo (m³/h)	178.5	174.8	176.9	183.7	180.9	161.5	174.9	178.2	165.3	179.2	183.0	180.8	178.2		
		A1 A2 Diametro	200.00/5	Largo 187.5 (m)													
		Velocidad (m/s)	1.695	1.660	1.679	1.744	1.718	1.533	1.661	1.692	1.570	1.702	1.737	1.716	1.692		
		Perdida de carga %	1.230	1.183	1.210	1.297	1.261	1.022	1.185	1.227	1.067	1.240	1.288	1.259	1.227		
		Golpe Ariete a añadir (m)	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	12	
		Ped de carga en tramo (m)	2.307	2.219	2.268	2.432	2.365	1.916	2.222	2.300	2.001	2.324	2.415	2.361	2.300		

Figura 127. Presión y velocidad del sistema

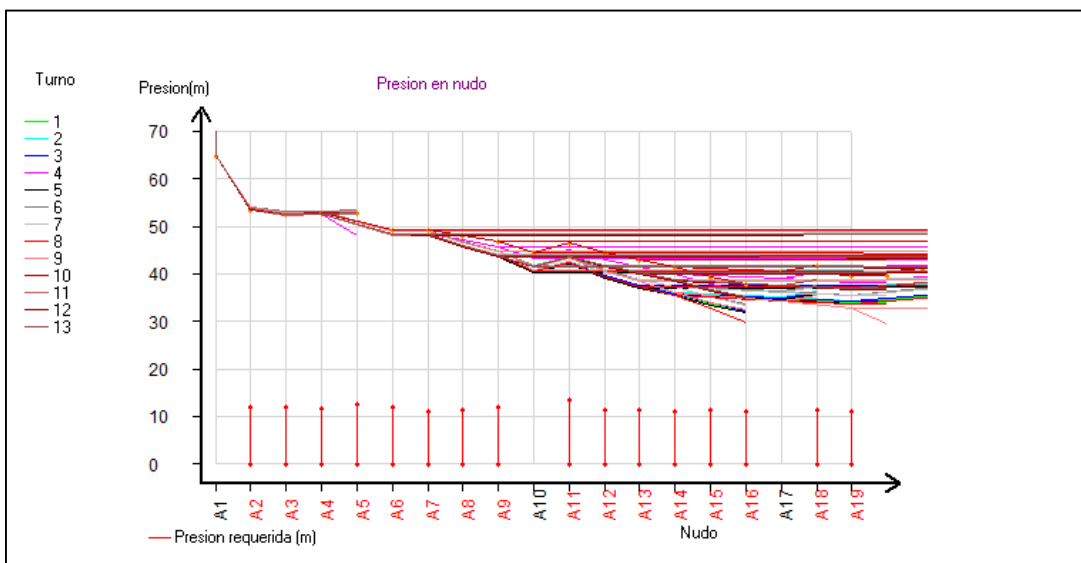


Figura 128. Presión en los nodos del sistema

S/area bloques conectados a T Ppal Y Presiones									
#	Opcions 0/1/2	S/area #	Bloque #	Bloque Presion (m)	Linea Ppal Presion (m)	Valvul Nombre	Turno Nº		
01	0	27	1	11.22	52.64	A2	10	19.4083	0
02	0	84	1	11.05	51.65	A3	10	34.8839	0
03	0	26	1	10.99	51.77	A4	10	20.6973	0
04	0	28	1	11.77	47.19	A5	4	28.6266	0
05	0	85	1	11.24	48.32	A6	10	35.6117	0
06	0	25	1	10.30	48.29	A7	10	31.4906	0
07	0	23	1	10.67	44.58	A8	11	30.656	0
08	0	22	1	11.07	42.73	A9	11	24.026	0
09	0	24	1	12.67	45.51	A11	10	37.1637	0
10	0	31	1	10.42	39.36	A12	7	26.3279	0

Figura 129. Especificaciones de bloques de riego

B3. Diseño del sistema de riego usando IrrigaCAD

Inicializar los programas

Se ejecutaron los programas IrrigaCAD y AutoCAD Civil 3D en modo administrador (Figura 130) para permitir la interacción entre estos, de tal forma que IrrigaCAD envía comandos que AutoCAD ejecuta.

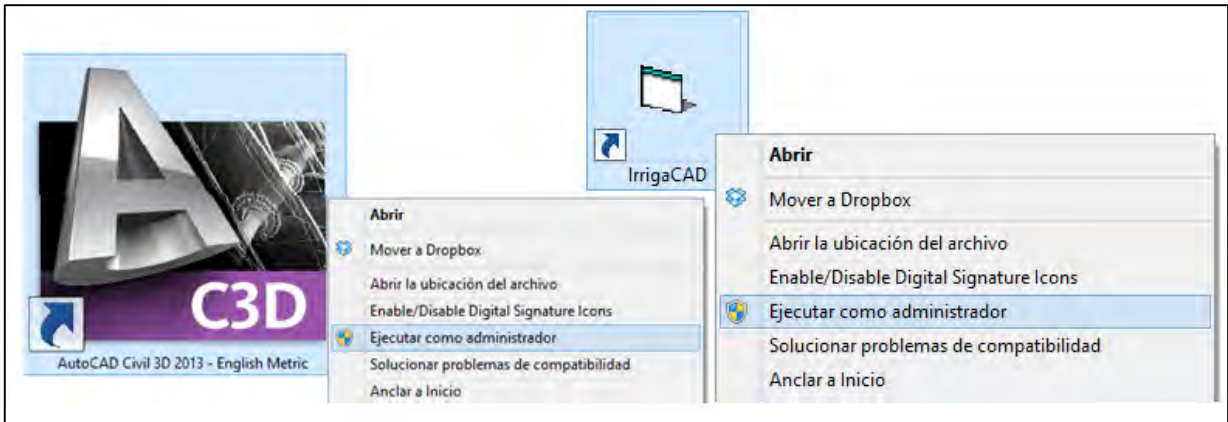


Figura 130. Ejecución de AutoCAD e IrrigaCAD

Configuración de la topografía

Una vez dentro del programa AutoCAD, se creó una nueva superficie, en la barra de herramientas "toolspace" se ingresó a la herramienta *surface* y se creó una nueva superficie (topografía), como se muestra en la Figura 131, a la nueva superficie creada se agregaron las curvas de nivel obtenidas de proyecto tipo (Figura. 132).

La topografía creada se guardó en una nueva capa llamada C-TOPO (Figura. 133), la cual se puede manipular con las herramientas de AutoCAD

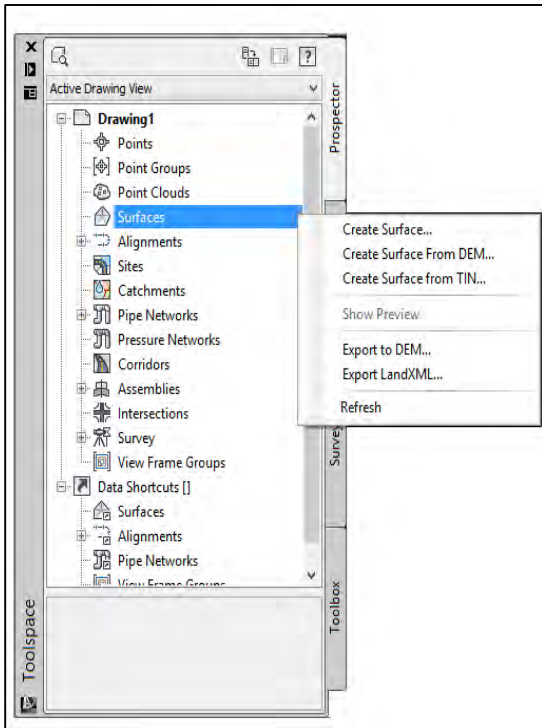


Figura 131. Crear topografía

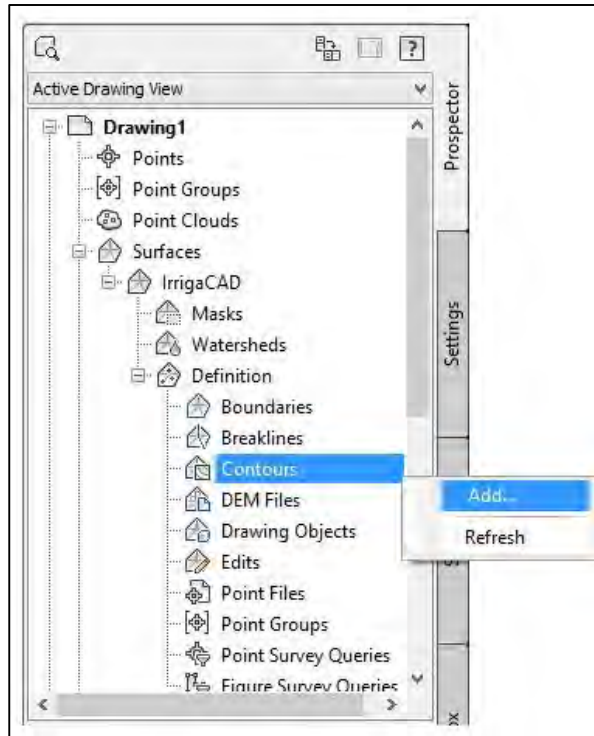


Figura 132. Agregar topografía existente

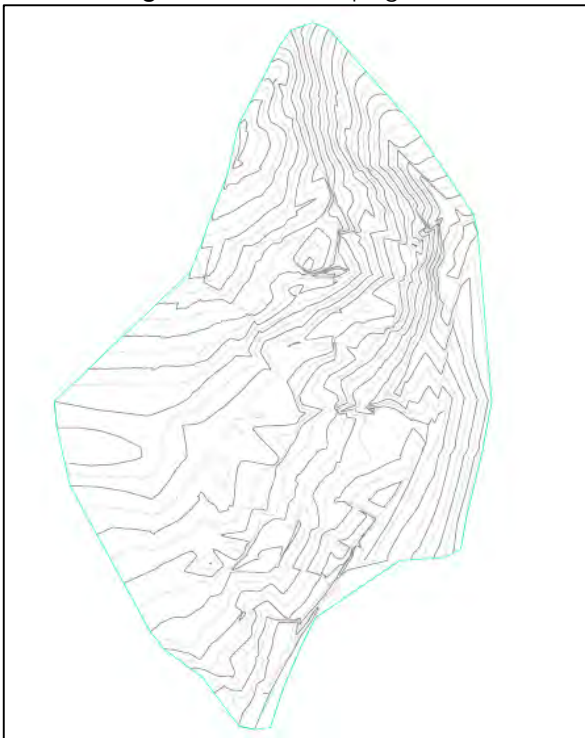


Figura 133. Topografía en AutoCAD Civil 3D

Configuración de IrrigaCAD

En la Figura 134 se muestra la pantalla general de IrrigaCAD, la cual cuenta con tres pestañas, donde cada una desglosa diversas opciones de la inferior, en este caso se utilizó la opción de configurar los datos técnicos del proyecto. En la Figura 135 se muestra la configuración de guardado del proyecto.

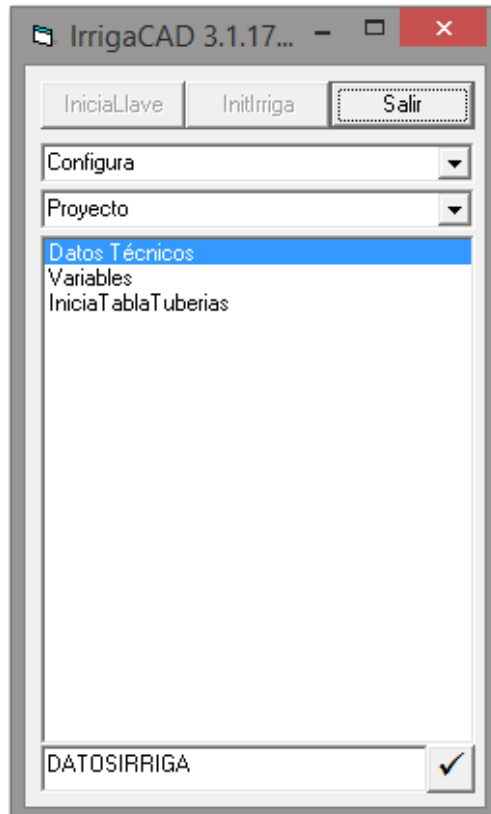


Figura 134. Configuración de datos técnicos



Figura 135. Configuración de ruta de guardado

Se configuraron los datos generales del proyecto, los cuales contemplan: escala, turnos, topografía y método para calcular pérdidas de carga (Figura 136).

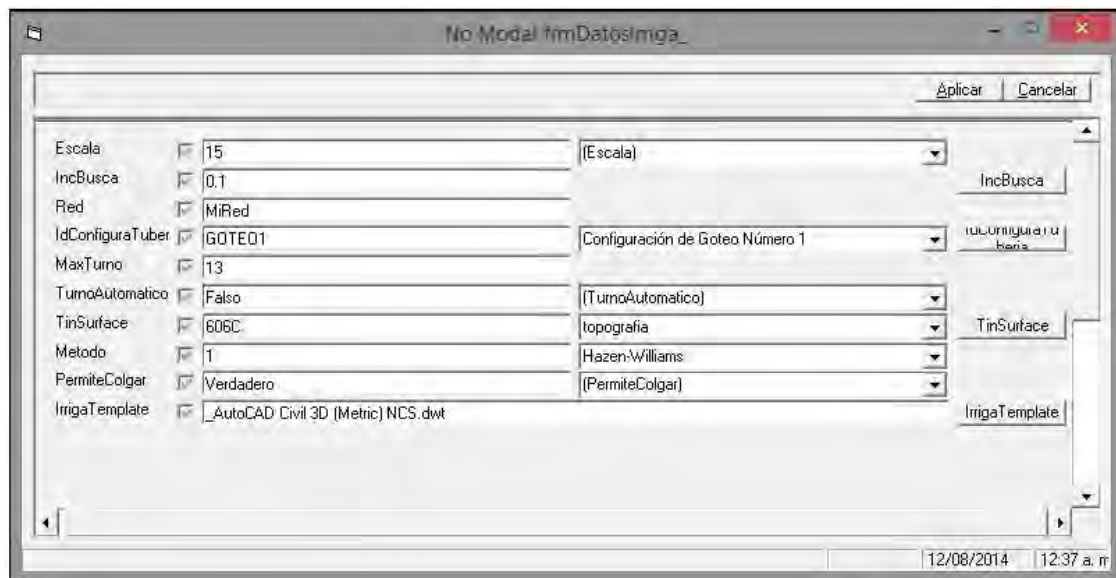


Figura 136. Datos generales

De la base de datos de IrrigaCAD se seleccionó el grupo de tuberías con el cual se trabajó para el diseño de la tubería principal, se agregaron diámetros de 50, 75, 100, 160, 200 y 250 mm de clase 5, para que el programa eligiera el más adecuado para cada tramo.

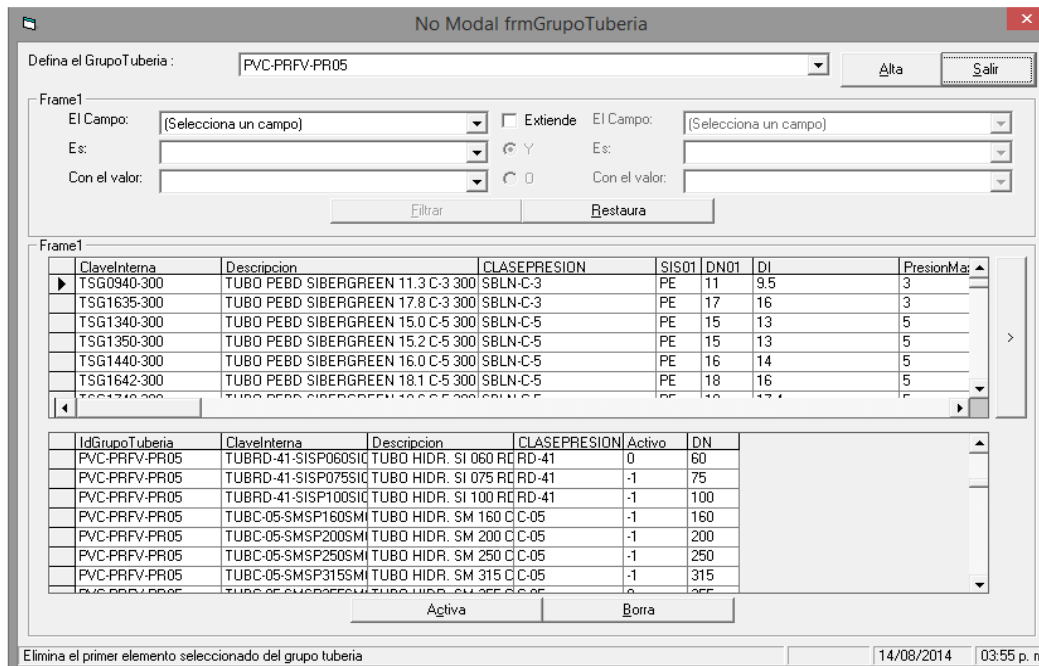


Figura 137. Archivos de tubería

Se crearon las capas en AutoCAD que se requieren para el diseño con la herramienta "Dibujo-Edición-crear capas".

Definición de bloques de riego

Se asignaron las parcelas del diseño tipo a la capa límite y se calculó su área y gasto, se seccionaron las parcelas mayores a 1 ha, con el fin de tener mayor control en la distribución de presiones y velocidades en el bloque de riego.

Calculo de laterales y secundarias

Se realizó el cálculo de las laterales con la herramienta *Cálculo/Lateral* (Figura 138). Se buscó la lateral máxima en dos direcciones, se seleccionó la topografía y una pendiente característica del terreno. Se propuso un diferencial de gasto en líneas laterales de 5 m y 12 m para tubería secundaria (Figura 139).



Figura 138. Herramienta para cálculo de lateral

Variables Globales					
HndValvula	<input checked="" type="checkbox"/>	HndValvula	(HndValvula)	HndValvula	HndValvula
Metodo	<input checked="" type="checkbox"/>	1 Hazen-Williams	ProblemaTipo	<input checked="" type="checkbox"/>	2 Problema Lateral 2
LngPerfilLateral	<input checked="" type="checkbox"/>	500	Busca la lateral máxima en las dos direcciones		
Origen Elevacion					
TinSurface	<input checked="" type="checkbox"/>	606C	topografia	TinSurface	TinSurface
Pendiente	<input checked="" type="checkbox"/>	1.72039019418794	Pendiente		
Limites de Presión y Gasto					
PMin	<input checked="" type="checkbox"/>	10	DQLat	<input checked="" type="checkbox"/>	5
		Gasto	DQSec	<input checked="" type="checkbox"/>	12
			DPLat	<input checked="" type="checkbox"/>	0.94559671455570
			DPSec	<input checked="" type="checkbox"/>	2.33515145951384

Figura 139. Parámetros técnicos de la lateral

Se ingresaron los datos del emisor y la separación entre laterales y emisores. Posteriormente se calculó la longitud máxima del lateral, la cual fue de 116 m como se muestra en la Figura 140.

Datos del Emisor					
Familia	<input checked="" type="checkbox"/>	(Familia)	(Familia)	(Familia)	(Familia)
Subfamilia	<input checked="" type="checkbox"/>	(SubFamilia)	(SubFamilia)	(SubFamilia)	(SubFamilia)
ClaveEmr	<input checked="" type="checkbox"/>	0811120-08	(Emisor)	(Emisor)	(Emisor)
CoefEmr	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3709	ExpEmr	<input checked="" type="checkbox"/>	0.54
			Kd	<input checked="" type="checkbox"/>	0.065
Datos de la Lateral					
GrupoTuberia	<input checked="" type="checkbox"/>	(GrupoTuberia)	(GrupoTuberia)	(GrupoTuberia)	(GrupoTuberia)
Tuberia	<input checked="" type="checkbox"/>	(Tuberia)	(Tuberia)	(Tuberia)	(Tuberia)
DI	<input checked="" type="checkbox"/>	0.016	SepEmr	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3
Coeficiente	<input checked="" type="checkbox"/>	135	NumEmrSal	<input checked="" type="checkbox"/>	1
PIncio	<input checked="" type="checkbox"/>	10.9428736206831	Max Lat1	<input checked="" type="checkbox"/>	116.1
SepLat	<input checked="" type="checkbox"/>	1	AreaEmr	<input checked="" type="checkbox"/>	0.3
			LH	<input checked="" type="checkbox"/>	4.37222228458807

Figura 140. Datos del emisor y obtención de la longitud máxima de la lateral

Se trazó el sentido de riego y de texto gráficamente con el comando *SentDeRiego* y *SentTexto* respectivamente. El sentido de riego el programa lo indicó con una flecha de color verde y el sentido del texto con una flecha de color morada tal como se muestra en la Figura 141.

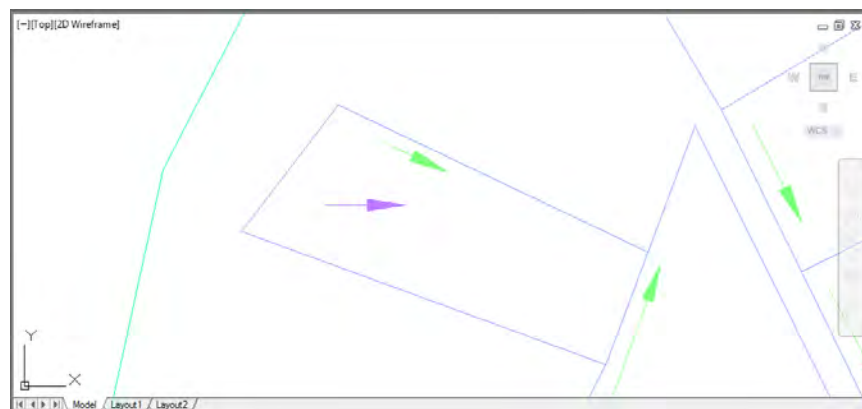


Figura 141. Trazo del sentido de riego y de texto

El trazo y el cálculo de la tubería secundaria o portalateral se realizó con la herramienta *Calculo/Portalateral*. Ésta herramienta muestra un cuadro de dialogo similar al del cálculo de la línea lateral (Figura 142).

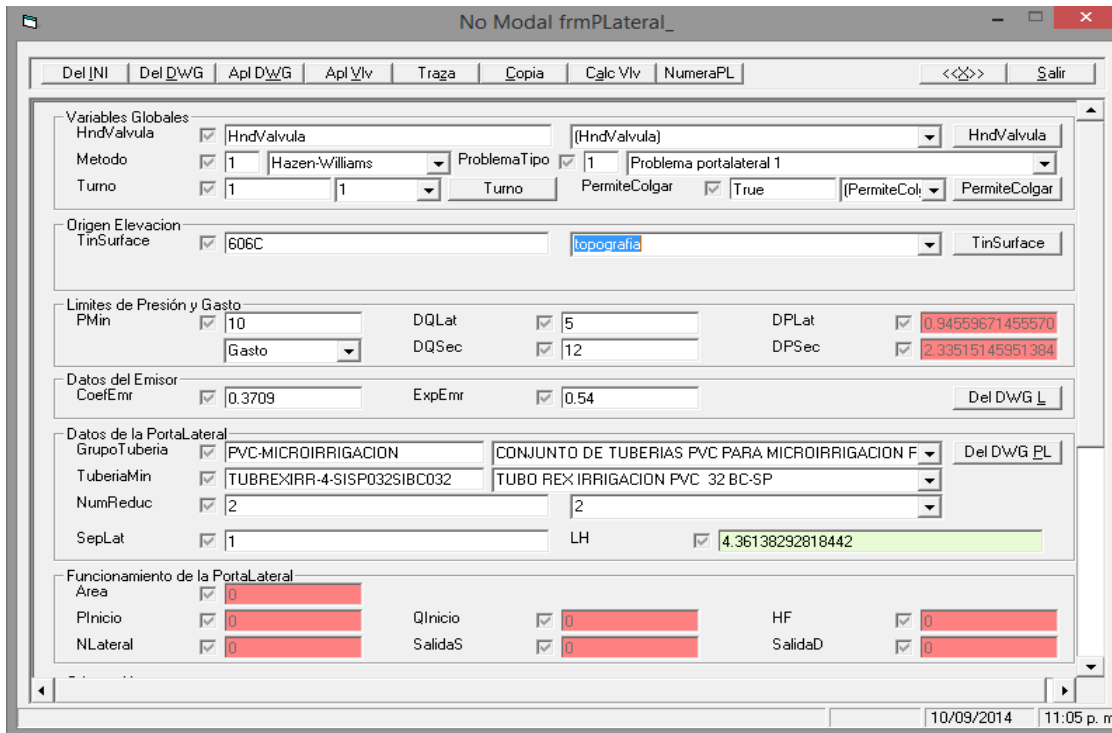


Figura 142. Datos técnicos de la tubería secundaria

Se cargaron los datos del DWG y se ejecutó la herramienta *traza* para dibujar la tubería secundaria, eligiendo un sentido de riego y de texto que fueron definidos anteriormente.

Se seleccionó una parcela y se trazó el inicio y el fin de la tubería secundaria como se muestra en la figura 143.

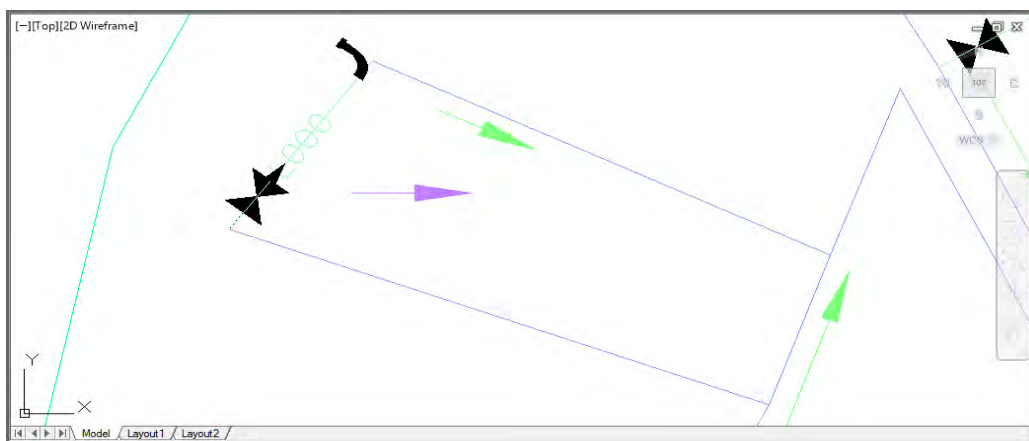


Figura 143. Trazo de la tubería secundaria

Al finalizar el proceso de trazado de la portallateral, el programa permite crearla nuevamente en otra parcela. Tomará el mismo sentido de riego y de texto que la anterior. En caso que éstos sean diferentes a la parcela donde se definió el trazo de la portallateral, con el botón derecho del *mouse* el programa permite elegir otro sentido de riego y de texto.

Se ejecutó la herramienta *Calc Vlv*, se seleccionó una válvula del bloque de riego. El programa automáticamente trazó las laterales y calculó el diámetro de la tubería secundaria (**Figura. 144**).

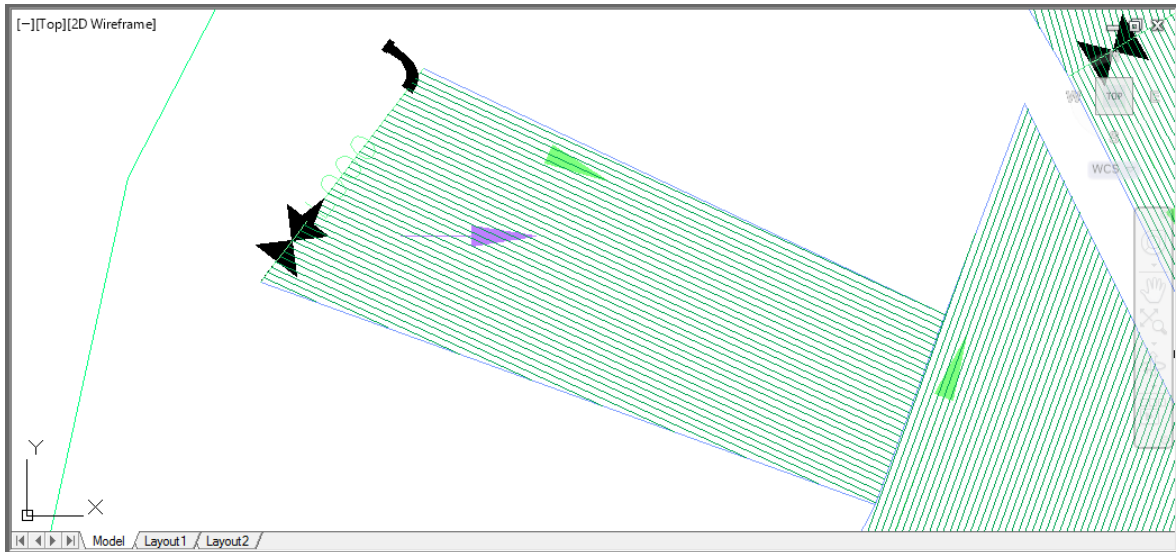


Figura 144. Trazo de las laterales y cálculo de la tubería secundaria

Trazo de red principal

Se trazaron los nodos en los puntos donde se bifurcó la tubería principal con la herramienta *Dibujo/Nodos/Nodo*, posteriormente se hizo el trazo de la tubería principal y la ubicación de la fuente de abastecimiento (Figura 145y **Figura>Error! o se encuentra el origen de la referencia.146**).

Con la herramienta *Red/Define/DepuraRed* el programa limpió los errores que se pudieran haber causado al definir el trazo de la tubería principal (Figura 147). Posteriormente se enumeraron los nodos, válvulas y los tramos de tubería (Figura 148).

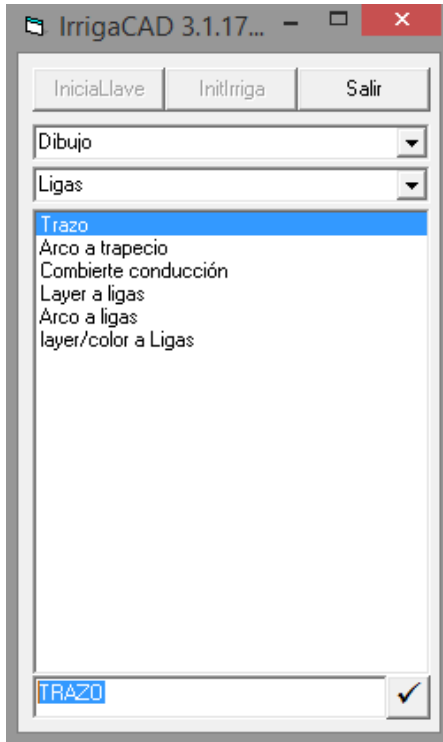


Figura 145. Herramienta para el trazo de la tubería principal

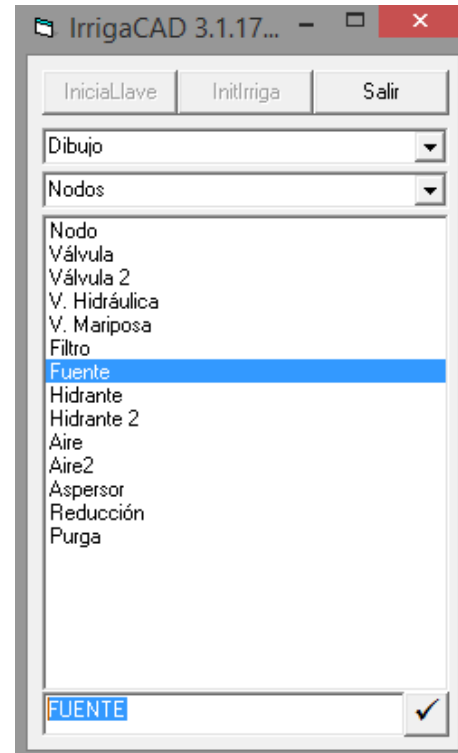


Figura 146. Herramienta para el trazo de la fuente

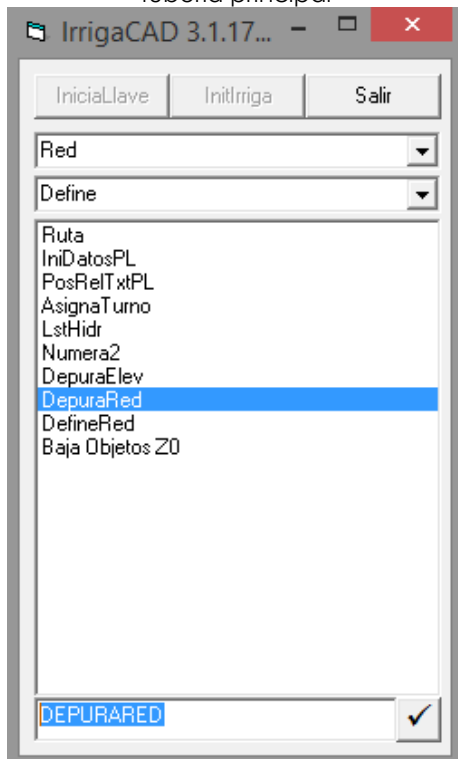


Figura 147. Herramienta DepuraRed

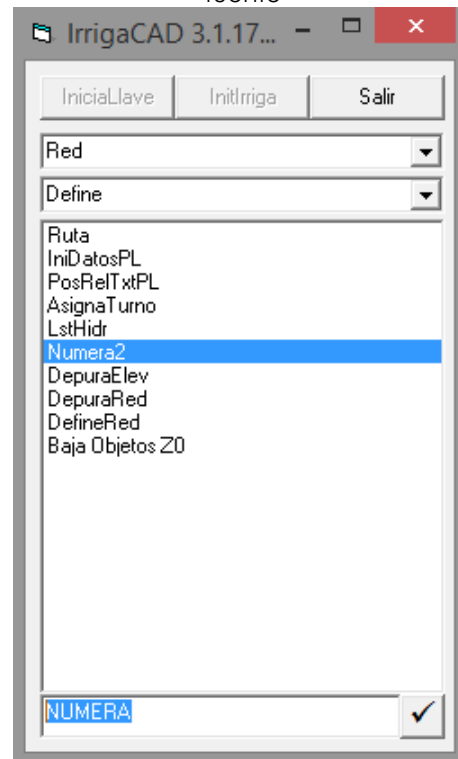


Figura 148. Herramienta Numera

Con la ayuda de la herramienta *MovTxtParcela* se ordenaron los datos de los bloques de riego (Figura 149).

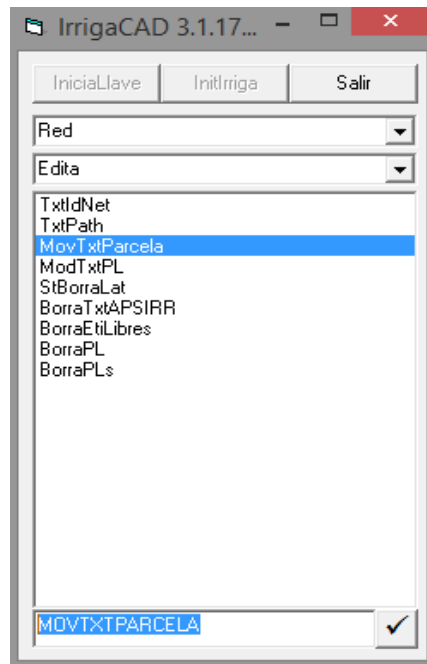


Figura 149. Herramienta MovTxtParcela

Para definir los turnos de riego se utilizó la herramienta *AsignarTurno*. Se seleccionaron las válvulas de control para cada turno de manera gráfica como se muestra en la Figura 150.

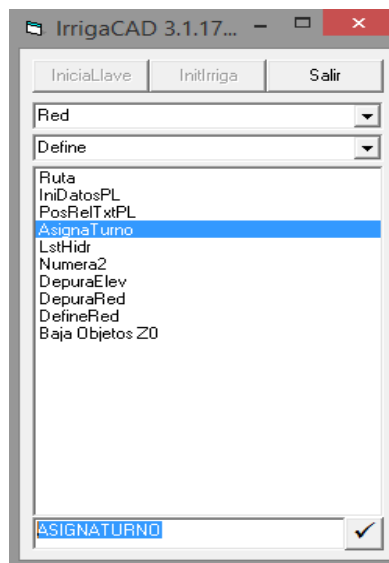


Figura 150. Herramienta AsignarTurno.

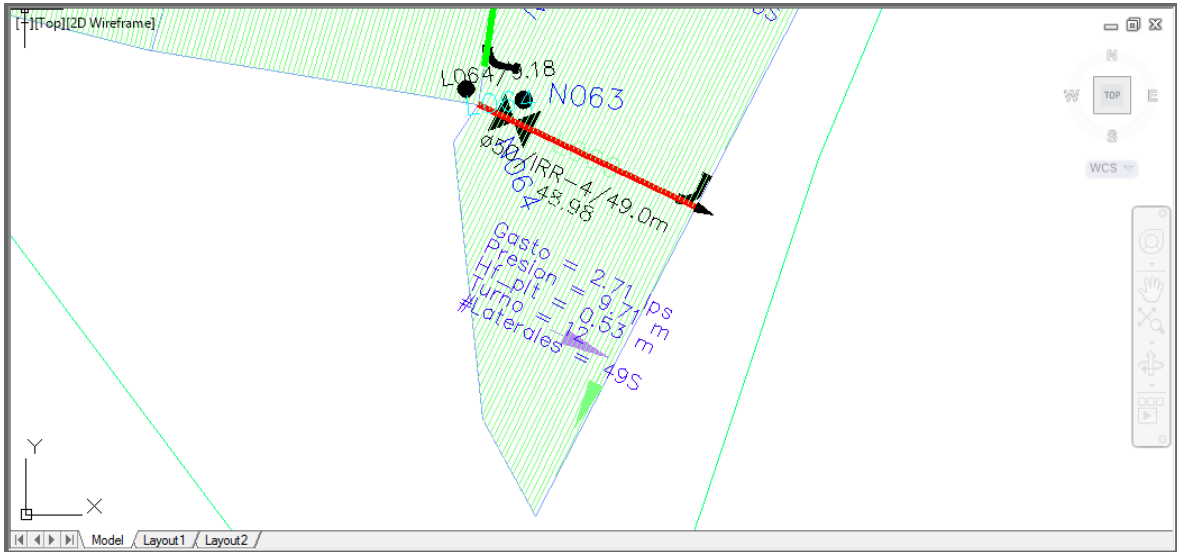


Figura 151. Asignación de turnos de riego

Se utilizó la herramienta *DepuraElev* y se indicó un valor *false*. En la sección de nodos del reporte del sistema se observaron las presiones mínimas de operación para cada válvula y el gasto nominal. Se indicó la presión máxima de la fuente de abastecimiento (Figura 152).

Nodo							
IdNodo	Nodo	Turno	QNom	AreaHidr	PresionMin	PresionMax	
N001	N001	0	0	0	0	70	
N002	N002	0	0	0	0	0	
N003	N003	0	0	0	0	0	
N004	N004	0	0	0	0	0	
N005	N005	6	7.3269844446	6047.8853691	10.970096307	0	
N006	N006	10	5.1853680524	4280.1389596	11.194399310	0	
N007	N007	10	5.7522438233	4748.0531072	11.092495916	0	
N008	N008	0	0	0	0	0	
N009	N009	0	0	0	0	0	
N010	N010	8	8.4390176541	6965.7867825	7.3692331874	0	
N011	N011	0	0	0	0	0	
N012	N012	0	0	0	0	0	
N013	N013	8	8.5386139008	7047.9961400	8.7282413761	0	
N014	N014	0	0	0	0	0	
N015	N015	0	0	0	0	0	

Figura 152. Reporte de nodos del sistema.

Nuevamente se utilizó la herramienta *DepuraRed* y se seleccionó la fuente de abastecimiento a la cual se ingresó su presión máxima de operación como se muestra en la Figura 153.

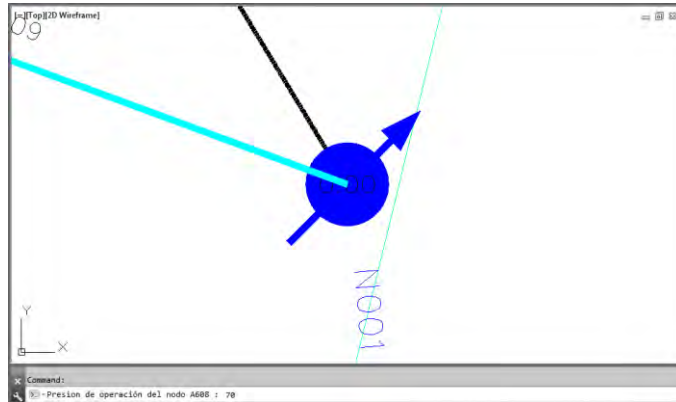


Figura 153. Proceso de ejecución de la herramienta DepuraRed.

Se ejecutó la herramienta *Red/Define/DefineRed* (Figura 154. Herramienta DEFINERED154) para definir la red principal. Con el comando *OptimizaRed* el programa calculó los diámetros de la tubería principal (Figura 155).

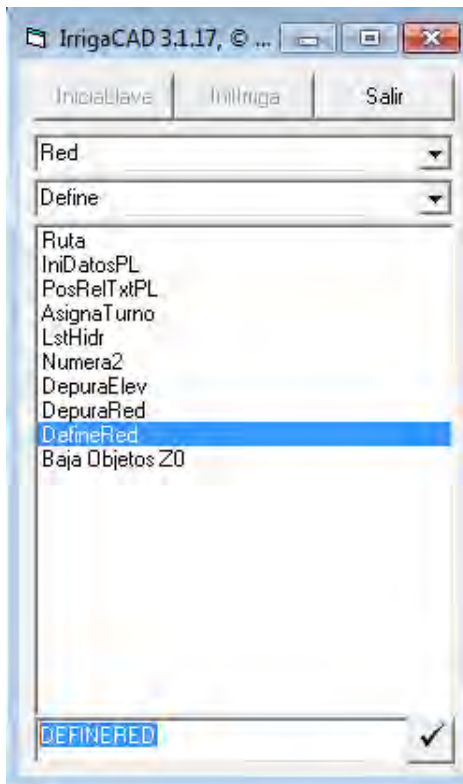


Figura 154. Herramienta DEFINERED

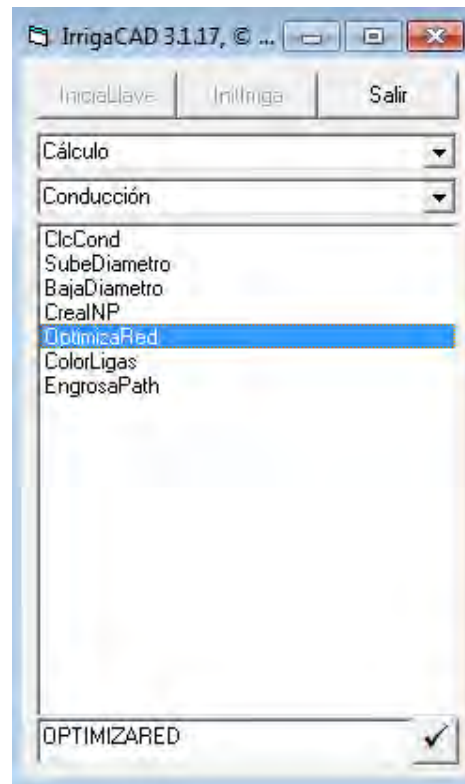


Figura 155. Herramienta OPTIMIZARED

Con el comando *ColorLigas* el programa definió el color para cada tubería de la red principal. Para crear los reportes de materiales se utilizó la herramienta *CreaNP* (Figura 156). Posteriormente con el comando *Recuento* se introdujo el valor 1 (*Path*) y se seleccionó el polígono envolvente del diseño. Finalmente con la herramienta *Área/Turno* (Figura 157) se evaluaron los turnos de riego para el sistema.

Impresión e importación de plano e informes del diseño

Se configuro la ventana de edición de planos de AutoCAD, se ajustó la escala adecuada y se guardó el archivo en formato PDF.



Figura 156. Herramienta CreaNP

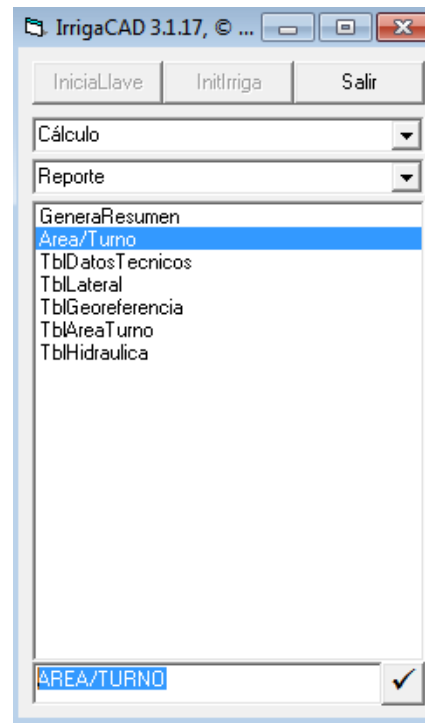


Figura 157. Herramienta Área/Turno

El archivo de reportes mostró la cantidad total de los diámetros de tubería en el sistema de riego (Figura 158).

TipoPRS	Orden	ClaveInterna	Semiclave	Cantidad
S		TUBREXIRR-4-SISP032SIBC032		3343.3831116
S		TUBREXIRR-4-SISP050SIBC050		2765.6652979
S		TUBREXIRR-4-SISP075SIBC075		2400.3933135
S		TUBREXIRR-4-SISP100SIBC100		145.77624884
S		TUBREXIRR-4-SMSP160SMCP160		216.6419154

Figura 158. Reporte de tuberías

Se configuro el template para la presentación de los planos y guardaron con formato PDF.

ANEXO C: Libro técnico sobre principios computacionales y agronómicos para calendarizar el riego en tiempo real.



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de Riego y Drenaje

Subcoordinación de Ingeniería de Riego



Principios computacionales y agronómicos para calendarizar el riego en tiempo real

Diciembre 2014

IMTA

Coordinación de Riego y Drenaje

Principios computacionales y agronómicos
para calendarizar el riego
en tiempo real

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez

Editores

México 2014

627.4 Ojeda Bustamante, Waldo

R52 Principios computacionales y agronómicos para calendarizar el riego en tiempo real/ Waldo Ojeda Bustamante; Jorge Flores Velázquez.
-México: IMTA, 2014
Xxx pp.
Incluye bibliografía
ISBN xxxxxx

1. Riego 2. Suelo 3. Evapotranspiración

Primera edición: 2014.

D.R © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

Progreso, Jiutepec, Morelos

CP 62550

ISBN xxxx-xxxx

Hecho en México – Printed in México

Autores¹

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Helene K. Unland Weiss

Jorge Flores Velázquez

Mauro Iñíguez Covarrubias

Waldo Ojeda Bustamante



Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

Abraham Rojano Aguilar

Agustín Ruiz García

Mauricio Carrillo García



Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Ernesto Sifuentes Ibarra

Hilario Flores Gallardo

Jaime Macías Cervantes

Rutilo López López



Colegio de Postgraduados (COLPOS)

Héctor Flores Magdaleno



¹ Por orden alfabético

PROLOGO

Éste libro es producto de varios años de trabajo relacionado con la transferencia del sistema de calendarización del riego en tiempo real en los distritos de riego 75 (Río Fuerte) y 76 (Valle del Carrizo), ambos localizados en el norte del estado de Sinaloa, México. Dicho sistema, llamado Spriter, cuenta con una base datos, actualizada diariamente, que contiene la información de consumo de agua de los cultivos, padrón de cultivos, características hídricas de los suelos y la dimensiones geométricas de cada parcela, características hidráulicas de la red de distribución que incluyen los puntos de control o tomas granja, las restricciones de volúmenes de agua y superficie por cultivo y ciclo agrícola, las demandas evapotranspirativas de referencia y las precipitaciones. Estas dos últimas son estimadas por una serie de estaciones meteorológicas automatizadas que conforman una red agrometeorológica que monitorea las variables meteorológicas a intervalos de tiempo menores de una hora.

La idea de escribir estos apuntes nació por la limitada bibliografía disponible sobre la calendarización del riego en español. Esta sólo es abordada someramente en libros sobre diseño de sistema de riego y en general sobre ingeniería de riego. Los conceptos y metodologías de la calendarización de riego se encuentran dispersos en libros y revistas sobre diferentes disciplinas como agrometeorología, sensores y controles, física y química de suelos, e ingeniería de riego, por mencionar algunas.

Una motivación adicional para actualizar este libro ha sido la puesta en marcha por parte de la Comisión Nacional del Agua de un programa integral llamado Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT). Dicho programa tiene varios componentes como trazo y diseño del riego, nivelación de tierras, pronóstico del riego, acompañamiento técnico, mejora de la infraestructura, planeación, seguimiento y evaluación, por mencionar algunos. Siendo el IMTA uno de los responsables de la implantación y seguimiento del RIGRAT en varios distritos del país, consideramos que este documento puede ayudar a consolidar la calendarización científica del riego como herramienta de apoyo para realizar un uso eficiente del agua, energía y fertilizantes en el marco de dicho programa nacional.

Versiones anteriores de este libro han servido como notas de cursos impartidos a personal técnico de varios distritos de riego del país y en cursos impartidos a estudiantes universitarios de la U. A. Chapingo. Se espera que esta versión sea accesible al personal técnico y agricultores que toman las decisiones asociadas con la calendarización del riego así como los estudiantes y profesores de las escuelas de agronomía del país.

Se agradece infinitamente las sugerencias y comentarios que durante los últimos años han aportado compañeros del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de la Universidad Autónoma Chapingo, Universidad A. de Sinaloa, INIFAP, y del Colegio de Postgraduados, pero muy especialmente el personal técnico y agricultores de los distritos de riego 075 y 076, entre los que destacan Juan Hernández, Tomás Espinosa, Jesús Zamorano, Alfredo Maudiel Gutiérrez, y Pedro Vázquez. Por último, queremos también agradecer a Mario Roure por la revisión final y detallada del manuscrito.

Waldo Ojeda Bustamante
Jorge Flores Velázquez

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1	3
1.1 IMPORTANCIA DEL RIEGO	3
1.2 DEFINICIÓN DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	6
CAPITULO 2	13
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	13
2.1 FUNCIÓN DEL SUELO	13
2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO	13
2.3 PROPIEDADES DEL SUELO	14
2.3.1 Textura.....	15
2.3.2.1 Métodos para estimar la textura	16
2.3.2 Materia orgánica (MO)	17
2.3.3 Densidad aparente (ρ_a)	18
2.3.3.1 Métodos para estimar la densidad aparente.....	19
2.3.4 Densidad real o densidad de partículas sólidas (ρ_s)	20
2.3.5 Porosidad del Suelo (ϵ)	21
2.3.6 Distribución del tamaño de partículas.....	23
2.3.7 Superficie específica (S_e)	23
2.3.8 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	26
2.3.9 Estructura.....	27
2.3.10 Perfil del suelo.....	28
2.4 EJEMPLOS.....	29

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 3	35
EL AGUA EN EL SUELO.....	35
3.1 INTRODUCCIÓN.....	35
3.2 HUMEDAD DEL SUELO (θ)	36
3.2.1 Contenido de humedad gravimétrico (θ_m).....	37
3.2.2 Contenido de humedad volumétrico (θ_v).....	37
3.2.3 Contenido de humedad a saturación(θ_s)	38
3.2.4 Capacidad de campo (θ_{CC}).....	39
3.2.5 Punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}).....	39
3.2.6 Humedad aprovechable (HA).....	40
3.2.7 Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA)	40
3.2.8 Humedad crítica (θ_c).....	43
3.2.9 Métodos para estimar la humedad del suelo	45
<i>Método gravimétrico</i>	46
<i>Determinación empírica de las constantes de humedad</i>	47
3.2.10 Lámina de riego (L_r)	48
3.3 ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA EN EL SUELO.....	53
3.3.1 Curva característica de retención del agua en el suelo	55
3.3.2 Constantes de tensión del agua en el suelo	57
3.3.3 Movimiento del agua en el sistema SPA (suelo-planta-atmósfera).....	57
3.4 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO	58
3.4.1 Conductividad Hidráulica a Saturación (K_s).....	59
3.4.2 Infiltración.....	59
3.5 EFICIENCIA Y UNIFORMIDAD DEL RIEGO	62
3.5.1. Uniformidad de distribución (U_d).....	63
3.5.2. Eficiencia de aplicación (E_a)	66
3.5.3 Eficacia del riego (EF).....	69
3.5.4 Coeficiente de uso consuntivo (CUC).....	70
3.5.5 Sagacidad del riego (S_r).....	70
3.5.6 Eficiencia del riego (E_r).....	71
3.5.7 Eficiencia en el Uso del Agua (E_u).....	72
3.6 EJEMPLOS.....	73

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 4	85
INDICADORES DE RIEGO	85
4.1 INTRODUCCIÓN.....	85
4.2 INDICADORES VEGETALES O DE LA PLANTA.....	88
4.3 INDICADORES EDÁFICOS	94
4.3.1 Contenido de humedad (θ).....	94
Método del tacto	95
Sonda de neutrones.....	95
Métodos dieléctricos	97
4.3.2 Estado energético del agua del suelo (h)	101
Tensiómetros	103
Problemas de manejo	108
Psicrómetro-termopar	108
Resistencias eléctricas en bloques porosos.....	109
4.4. INDICADORES EVAPORATIVOS.....	110
4.4.1 Tanque evaporímetro.....	111
4.4.2 Atmómetro	113
4.5 INDICADORES EVAPOTRANSPIRATIVOS	114
4.6 BALANCE DE HUMEDAD.....	125
4.7 SITIOS DE MUESTREO.....	126
4.8 EJEMPLOS.....	127

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 5	131
EVAPOTRANSPIRACIÓN	131
5.1 INTRODUCCIÓN	131
5.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	136
5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	136
5.3.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia	139
5.3.2 Correlación turbulenta (Eddy correlation)	140
5.3.3 Relación de Bowen	140
5.3.4 Ecuaciones semiempíricas	141
5.3.5 Método del tanque evaporímetro	143
5.3.6 Método de Blaney-Criddle	146
5.3.7 Ecuación de Priestley y Taylor	148
5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LOS CULTIVOS BAJO CONDICIONES ESTÁNDARES (ET_c)	149
5.4.1 Coeficiente de cultivo basal (K_{cb})	151
5.4.2 Cálculo del coeficiente de cultivo mediante el método FAO	154
5.4.3 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo basal (K_{cb})	156
5.4.4 Coeficiente de cultivo para frutales jóvenes	157
5.5 COEFICIENTES DE CULTIVO BAJO CONDICIONES NO ESTÁNDARES (K_c)	159
5.6 EJEMPLOS	165

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 6	169
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	169
6.1 INTRODUCCIÓN.....	169
6.2 MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO	172
6.3 PROFUNDIDAD DE RAÍCES (P_r).....	177
6.4 PRECIPITACIÓN EFECTIVA (P_e)	186
6.5 ASCENSO CAPILAR (A_c).....	191
6.6 REQUERIMIENTOS DE LAVADO.....	193
6.7 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO	197
6.8 REQUERIMIENTOS DE RIEGO (RR).....	199
6.9 INTERVALO DE RIEGO (IR).....	200
6.10 NÚMERO DE RIEGOS (NR)	200
6.11 PRÓXIMO RIEGO	201
6.12 CAPACIDAD DEL SISTEMA (Q_s).....	201
6.13 TIEMPO DE RIEGO (T_r).....	204
6.13.1 Estimación del tiempo de riego basado en el flujo de entrega	204
6.13.2 Estimación del tiempo de riego basado en la intensidad de aplicación.....	205
6.14 LÁMINA DE RIEGO APLICADA	206
6.15 LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y LOS MÉTODOS DE RIEGO	207
6.15.1 Riego por gravedad.....	208
6.15.2 Riego por aspersion	209
6.15.3 Riego por microirrigación	209
6.16 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ ..	212
6.17 EJEMPLOS.....	214

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 7	221
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN INVERNADERO	221
7.1 INTRODUCCIÓN.....	221
7.2 EL RIEGO EN INVERNADEROS	222
7.3 REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS BAJO INVERNADERO.....	223
7.3.1 Evapotranspiración	226
7.4 MÉTODOS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_0) EN FUNCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS	228
7.5 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_R).....	229
7.5.1 Lisímetro	229
7.6 CALENDARIZACION DEL RIEGO	230
7.6.1 Utilizando variables climáticas	232
7.6.2 Mediante variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato	236
7.7 PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	237
7.7.1 Algunas maneras de programar el riego en invernaderos son:	237
7.8 SOPORTE DE LA PLANTA (MEDIO DE CULTIVO)	243
7.8.1 Curva característica de retención de agua	247
7.8.2 Los tipos de agua en los sustratos.....	249
7.9 TEZONTLE COMO SUSTRATO	250

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 8	255
LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO DEL CULTIVO DE MAÍZ	255
8.1 INTRODUCCIÓN.....	255
8.2 LA IMPORTANCIA DEL RIEGO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ.....	257
8.2.1 Factores limitantes de la producción	257
8.2.2 Factores asociados a la calendarización del riego	258
8.3. MÉTODOS DE CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	260
8.3.1 La planta como indicador	260
8.3.2 El suelo como indicador	261
8.4 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y TIEMPO TÉRMICO.....	262
8.4.1 Programación integral bajo condiciones de escasez	265
8.4.2 Manejo del último riego	265
8.4.3 Tecnologías de información y comunicación (TIC'S)	267

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 9	271
LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS	271
9.1 INTRODUCCIÓN.....	271
9.2 FACTORES ASOCIADOS CON LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN LAS HORTALIZAS	273
9.2.1 Clima.....	273
9.2.2 Calidad del agua de riego	273
9.2.3 Especie de cultivo	274
9.2.4 Suelo.....	274
9.2.5 Sistema de producción.....	274
9.3. EL RIEGO POR GOTEO	277
9.3.1 Evapotranspiración del cultivo.....	278
9.3.2 Coeficientes de cultivos (Kc)	278
9.3.3 Monitoreo de la tensión de humedad del suelo	279
9.4 RENDIMIENTO DE FRUTOS Y USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO (UEAR) EN CHILE HABANERO Y TOMATE DE CÁSCARA	280
9.4.1 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de chile habanero.....	280
9.4.2 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de tomate de cáscara.	284
9.5 CONCLUSIONES	288
CAPITULO 10.....	289
LITERATURA CITADA	289

ÍNDICE DE CONTENIDO

ANEXOS

ANEXO A	A-3
ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS	A-3
A.1 INTRODUCCIÓN.....	A-3
A.2 REDES DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS.....	A-3
A.3 DESCRIPCIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	A-4
A.4 ESTÁNDARES PARA ALTURAS Y EXPOSICIÓN DE LOS SENSORES METEOROLÓGICOS	A-6
A.4.1 Estándares Internacionales	A-6
A.4.2 Estándares para Alturas y Exposición de Sensores en las EAA de la Red Agroclimatológica Nacional.....	A-10
Altura de 2 m aceptable	A-11
A.4.3 Criterios de Precisión.....	A-16
A.4.4 Criterios de Ubicación.....	A-17
A.4.5 Mantenimiento de las ECA	A-19
A.5 LITERATURA CONSULTADA.....	A-22
ANEXO B	B-3
TIEMPO TÉRMICO Y FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS	B-3
B.1 INTRODUCCIÓN	B-3
B.2 GRADOS DÍA DESARROLLO (oD).....	B-5
B.3 FENOLOGÍA	B-12
B.4 LITERATURA CONSULTADA	B-14
ANEXO C	C-3
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO USANDO EL CONCEPTO DE TIEMPO TÉRMICO	C-3
C.1 Introducción	C-3
C.2 Ecuaciones para la calendarización integral del riego.....	C-4
C.3 Ejemplo de aplicación para maíz.....	C-9
C.4 Literatura consultada	C-11

ÍNDICE DE CONTENIDO

ANEXO D	D-3
EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO USANDO CROPWAT	D-3
D.1 INTRODUCCIÓN	D-3
D.2 EJEMPLO DE REFERENCIA	D-3
D.2.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia	D-4
D.2.2 Parámetros para la programación de riego	D-6
D.2.3 Requerimientos y programa de riego de los cultivos	D-7
D.3 CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS UTILIZANDO CROPWAT	D-11
D.3.1 Pantalla principal de sistema	D-12
D.3.2 Datos climáticos	D-17
D.3.3 Cultivos	D-19
D.3.4 Suelos	D-21
D.3.5 Requerimientos y programación del riego	D-22
D.4 LITERATURA CONSULTADA	D-30
ANEXO E	E-3
AQUACROP: UNA HERRAMIENTA PARA GENERAR CALENDARIOS DE RIEGO	E-3
E.1 INTRODUCCIÓN	E-3
E.2 DESCRIPCIÓN TEORICA.....	E-5
E.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	E-9
E.4. EJEMPLO DE APLICACION PARA MAÍZ.....	E-14
E.5 LITERATURA CONSULTADA.....	E-20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Rendimiento normalizado en función de la lámina aplicada normalizada. R_r es el rendimiento real, R_m es el rendimiento máximo potencial, L_b es la lámina bruta aplicada y L_n la lámina neta requerida.....	5
Figura 1.2 Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento de dos cultivos bajo condiciones de estrés hídrico.....	6
Figura 1.3 Variación del contenido de humedad durante el ciclo fenológico de un cultivo.	7
Figura 1.4 Riego por inundación sin control.....	8
Figura 2.1 Comparación del tamaño de partículas del suelo y raíces.....	15
Figura 2.2 Triángulo de texturas.....	16
Figura 2.3 Variación típica del contenido de materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola.....	18
Figura 2.4 Distribución acumulada del tamaño de partículas para cuatro tipos de suelos.	23
Figura 2.5 Superficie específica para varias formas de partículas sólidas.....	25
Figura 2.6 Variación típica de la estructura de un suelo agrícola.	27
Figura 2.7 Disposición de los estratos en un perfil de un suelo agrícola.	28
Figura 3.1 Constantes de humedad (θ) del suelo.	36
Figura 3.2 Constantes de humedad para varias texturas de suelo.....	40
Figura 3.3 Modelo de barril para representar las constantes de humedad.	44
Figura 3.4 Relación entre volumen y lámina para una área unitaria.....	49
Figura 3.5 Profundidad efectiva radical máxima en centímetros sin restricciones de crecimiento.	51
Figura 3.6 Una lámina de 10 cm moja una profundidad de 100 cm asumiendo $\rho_a = 1.25 \text{ gr cm}^{-3}$, $\theta_{mcc} = 0.23 \text{ gr gr}^{-1}$ y $\theta_{mi} = 0.15 \text{ gr gr}^{-1}$	52
Figura 3.7 Curvas características de tres suelos agrícolas, adaptada de Cuenca (1989).	56
Figura 3.8 Rango de tensiones del suelo para obtener máximo rendimiento (Lomas y Levin, 1979).	57
Figura 3.9 Curvas típicas para la velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada de un suelo.....	60
Figura 3.10 Infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración en campo ..	62
Figura 3.11 Distribución de la lámina aplicada en un riego en surcos.	67
Figura 3.12 Diferentes escenarios de eficiencia y uniformidad que pueden presentarse al finalizar el riego.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Componentes del balance hídrico en la zona radical.	86
Figura 4.2 Variación de un indicador de riego de acuerdo con la calendarización del riego.....	87
Figura 4.3 Pistola de rayos infrarrojos operando en campo para medir la temperatura del follaje.	90
Figura 4.4 Curvas base usadas para el cálculo del IEHC.....	92
Figura 4.5 Parámetros asociados con el indicador de humedad del suelo.....	94
Figura 4.6 Aspersor de neutrones en campo.....	96
Figura 4.7 Curva de calibración típica de una sonda de neutrones.....	97
Figura 4.8 Dos varillas tipo TDR para estimar la humedad del suelo. Como referencia se presenta una regla y un minitensiómetro equipado con traductor de presión.....	98
Figura 4.9 Relación típica entre constante dieléctrica y contenido de humedad volumétrico.	100
Figura 4.10 Posición relativa de los tensiómetros en función del cultivo.....	102
Figura 4.11 Representación esquemática posiciones recomendadas de colocar tensiómetros.....	104
Figura 4.12 Componentes de un tensiómetro instalado en campo (A) y escala de valores del potencial mátrico en centibares (B).	104
Figura 4.13 Variación de la tensión del agua en el suelo a dos profundidades: 45 y 90 cm bajo un buen manejo del riego.....	107
Figura 4.14 Bloque poroso con su medidor de resistencia eléctrica.....	110
Figura 4.15 Variación de la tasa evaporativa en función del tamaño del tanque de medición (Adaptado de Ward, 1967).	111
Figura 4.16 Tanque evaporímetro tipo A.	112
Figura 4.17 Representación simplificada de un lisímetro de pesada.....	115
Figura 4.18 Esquema del lisímetro de balance.....	116
Figura 4.19 Valores promedio mensuales de la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de Penman-Montieth así como los valores correspondientes a lisímetros instalados en once localidades alrededor del mundo (Allen, <i>et al.</i> , 1998).	117
Figura 4.20 Lisímetro de pesada. A) Imagen de la superficie del suelo en la que se aprecian al fondo dos estaciones meteorológicas, B) imagen interior con detalles del sistema de monitoreo.....	118
Figura 4.21 Toma aérea del lisímetro de pesada instalado en el CENID-RASPA del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de La Laguna, México.	119
Figura 4.22 Medidores de savia instalados en dos ramas de un árbol.....	120
Figura 4.23 Sensor de flujo de savia para estimar la evapotranspiración del cultivo.....	121
Figura 4.24 Esquema que muestra las variables para el cálculo del flujo de savia.	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1 Componentes meteorológicos relacionados con la evapotranspiración.	132
Figura 5.2 Variación horaria de la evaporación del suelo y transpiración sin la presencia de un evento de riego (Thompson, <i>et al.</i> , 1996).....	133
Figura 5.3 La variación de los componentes de la evapotranspiración durante el ciclo fenológico de un cultivo (Allen <i>et al.</i> , 1998).	134
Figura 5.4 Balance hídrico a nivel fitósfera.	134
Figura 5.5 Pasos requeridos para estimar la evapotranspiración real de un cultivo.	136
Figura 5.6 Comparación de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia: pasto y alfalfa (Wright, 1996).	137
Figura 5.7 Variación de la evapotranspiración de referencia (ET _o) en el Valle del Carrizo (1995-1998).....	139
Figura 5.8 Valores de la ET _o obtenidos a partir de un tanque evaporímetro y una estación meteorológica (ecuación de Penman-Montieth).	146
Figura 5.9 Variación del coeficiente de cultivo basal (K _{cb}) en función del ciclo fenológico con la curva real y la curva aproximada por interpolación lineal.	152
Figura 5.10 Valores típicos de K _{cb} para diferentes cultivos en la etapa de máxima cobertura vegetal (fuente: Allen, <i>et al.</i> , 1998).	153
Figura 5.11 Variación cualitativa del coeficiente de cultivo basal para varios cultivos en la última fase fenológica (fuente: Allen, <i>et al.</i> , 1998).	153
Figura 5.12 Variación del K _{cb} en función de las condiciones climáticas durante la etapa de máxima cobertura vegetal (Fuente: Allen, <i>et al.</i> , 1998).	154
Figura 5.13 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo.	156
Figura 5.14 Variación del factor evapotranspirativo (f _s) para árboles jóvenes, expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros, en función del porcentaje de sombreado (R).....	159
Figura 5.15 Variación del factor de estrés hídrico del suelo (K _e) de acuerdo a dos modelos: lineal y logarítmico.	161
Figura 5.16 Comparación del coeficiente de cultivo bajo condiciones estándares (K _{cb}) y no estándares (K _c).	164
Figura 5.17 Variación de la evapotranspiración en sus tres versiones (referencia, cultivo y real) para el cultivo de maíz otoño-invierno en el Valle del Fuerte, Sinaloa.	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.1 Componentes de la calendarización del riego.	169
Figura 6.2 Componentes que intervienen en el balance de agua en la zona de raíces.....	173
Figura 6.3 Variación horaria de la humedad en el estrato superior de un suelo cultivado.	174
Figura 6.4 Variación del déficit de humedad durante el ciclo fenológico del cultivo en Días Después de Siembra (DDS).	176
Figura 6.5 Componentes que intervienen en la extracción de agua realizada por las raíces.....	178
Figura 6.6 Patrón típico de extracción de humedad realizada por las raíces.....	179
Figura 6.7 Crecimiento radical lineal de la papa.	180
Figura 6.8 Variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo para cuatro valores (0.1, 0.5, 1 y 2) del parámetro W de la ecuación (6.10).	181
Figura 6.9 Desarrollo radical en función de la frecuencia de riego (Lomas y Levin, 1978).	182
Figura 6.10 Desarrollo radical en función del porcentaje de desarrollo para el maíz.	185
Figura 6.11 Estados en la emergencia de una planta dicotiledónea (Merva, 1995).	185
Figura 6.12 Variación del escurrimiento (E_s) en función de la precipitación y el número de curva.....	190
Figura 6.13 Porcentaje de aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos en función del coeficiente de cultivo para algodón a dos profundidades (1.2 y 2 m) del mánto freático y una salinidad de 15.4 dS/m (adaptado de Ayars y Hutmacher, 1994).	191
Figura 6.14 Contribución del manto freático a la zona de raíces en mm/d (Doorenbos y Pruitt, 1977).....	193
Figura 6.15 Tiempo de riego para aplicar una lámina bruta de 10 cm en función del área dominada bajo cuatro gastos (40, 80, 120 y 160 l s^{-1}).....	205
Figura 6.16 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego por gravedad.....	208
Figura 6.17 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego de baja intensidad y alta frecuencia.....	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 7.1 Características de un pimiento cultivado en invernadero.....	222
Figura 7.2 Invernadero tipo cenital de 5 naves.	223
Figura 7.3 Circulación del agua del suelo a través de la planta hasta la atmósfera.....	224
Figura 7.4 El proceso de gutación.	225
Figura 7.5 Formación de la ecuación de balance a nivel lisímetro.	226
$RR = RIEGO - DRENAJE \pm \Delta\theta = Evaporacion + Transpiracion = ETr$	Ec
7.1.....	226
Figura 7.6 Cultivo de frijol en invernadero, un alto Índice de Área Foliar para transpirar.	227
Figura 7.7 Evolución temporal de la ETr en el ciclo de cultivo de tomate en invernadero.....	228
Figura 7.8 Procesos inherentes al balance de energía en un invernadero.	229
Figura 7.9 Esquema de un lisímetro de balance en un invernadero.	230
$RR = RIEGO - DRENAJE = ETr$	Ec.
7.3.....	230
Figura 7.10 Sistema de riego por goteo en sustrato tezontle rojo.....	231
Figura 7.11 Variación de la transpiración en función de la radiación al interior del invernadero.....	233
Figura 7.12 Evolución del contenido de agua del suelo tras varios ciclos de riego. (Fernández et. Al. 2005).	236
Figura 7.13 Sistema de riego por goteo tipo “espagueti” en bolsas de tezontle.	237
Figura 7.14 Calendarización del riego en función de la radiación.....	239
Figura 7.15 Sensibilidad del cultivo en la aplicación de los riegos.....	240
Figura 7.16 Cultivo de hortalizas en sistemas hidropónicos.	241
Figura 7.17 Sensor de flujo de savia para determinar el momento del riego.	242
Figura 7.18 Diversas técnicas usadas como medio de cultivo, aeroponía, hidroponía, acuaponía, etc.	243
Figura 7.19 Sistema hidropónico con movimiento circular.....	244
Figura 7.20 Turba usada como sustrato.	246
Figura 7.21 Curva característica de retención de agua de un sustrato. (De Boodt et al., 1974; Handreck y Black, 1991).....	249
Figura 7.22 Cultivo de tomate en sustrato de tezontle.....	251
Figura 7.23 Curva de retención de humedad para sustrato de tezontle (Ojeda, 2004).	251

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 8.1. Evolución de la superficie sembrada y rendimiento de maíz en Sinaloa de 1981 a 2014.....	256
Figura 8.2. Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (MCLF y MCPVC).....	257
Figura 8.3. Factores limitantes de la producción.....	258
Figura 8.4. Fenología del cultivo de maíz y su relación con el tiempo térmico o grados día (°D) (Ojeda y Sifuentes, 2006).....	259
Figura 8.5. Plantas de maíz con efectos contrastantes de estrés hídrico visual.	260
Figura 8.6. Constantes hídricas por textura del suelo (Sifuentes <i>et al.</i> , 2013), adaptado de Rawls y Brakensiek (1983). (R = arcilla, L=limo, A=arena, M=Franco).	261
Figura 8.7. Monitoreo de la humedad del suelo con TDR y uso de sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para seguimiento del riego a nivel parcelario	262
Figura 8.8. Sistemas de riego para la producción de maíz.	264
Figura 8.9. Aplicación innecesaria del último riego en etapa R5 (grano dentado).	266
Figura 8.10. Predicción del último riego mediante programación integral.....	267
Figura 8.11. Aplicaciones computacionales para la programación integral del riego.	268

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 9.1. Variación de los elementos del clima (temperaturas máxima y mínima y precipitación) y láminas de riego durante el ciclo del cultivo de chile habanero, O-I/2012-2013. Huimanguillo, Tabasco, México.....	274
Figura 9.2. Fuente de abastecimiento de agua superficial para riego y sistema de filtrado de grava y arena.	275
Figura 9.3. Producción de plántulas de chile habanero en charolas 50 y 200 cavidades en vivero.	276
Figura 9.4. Cultivo de chile habanero con cubierta plástica de color plateado-negro en Huimanguillo, Tabasco, México.	277
Figura 9.5. Cultivo de tomate de cáscara con cubierta plástica y espalderas en Huimanguillo, Tabasco México.	277
.....	278
Figura 9.6. Sistema de riego por goteo para el cultivo de sandía en el municipio de Balancán, Tabasco.	278
Figura 9.7. Instalación de sistema de riego por goteo con cintas y cubierta plástica.	279
.....	279
Figura 9.8. Tensiometros instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el cultivo de chile habanero.	281
Figura 9.9. Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento de frutos en kg ha ⁻¹ por corte del cultivo de chile habanero con riego por goteo en el ciclo O-I/2012-2013.....	283
Figura 9.10. Efecto de la lámina de riego y la precipitación en el potencial matricio del suelo a la profundidad de 15 y 30 cm en el cultivo de chile habanero con cubierta plástica.	284
Figura 9.11. Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento por corte de frutos de tomate verde con riego por goteo en el ciclo OO-I/2011-2012.	285
Figura 9.12. Rendimiento de frutos en t ha ⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un Fluvisol de Huimanguillo, Tabasco.	286
Figura 9.13. Rendimiento de frutos en t ha ⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un suelo Fluvisol del Campo Experimental Huimanguillo.....	287
Figura 9.14. Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a dos profundidades (15 y 30 cm) en el cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo y cubierta plástica en el ciclo 2012- 13.	288

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A.1 Estación agrometeorológica automatizada.	A-5
Figura A.2 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de pluviómetros en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).	A-9
Figura A.3 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de anemómetros y veletas en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).	A-12
Figura A.4 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).	A-13
Figura A.5 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación del sensor de radiación solar en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).	A-14
Figura A.6 Distribución discreta de la frecuencia de profundidades de instalación del sensor de temperatura del suelo en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).	A-15
Figura A.7 Estación meteorológica en una zona de riego.	A-18
Figura A.8 Distribución discreta de la frecuencia de mantenimiento de redes de ECA.	A-20
Figura B.1 Tasa de desarrollo en un organismo en función de la temperatura. .	B-5
Figura B.2 Concepto de Día Grado Desarrollo asumiendo temperatura diurna constante.	B-6
Figura B.3 Modelo triangular de la variación horaria de la temperatura.	B-7
Figura B.4 Ajuste de un modelo triangular a la variación de la temperatura horaria de un día.	B-7
Figura B.5 Caso de corte superior para el cálculo de los grados día.	B-8
Figura B.6 Casos de localización de la curva de la temperatura con respecto a las temperaturas biológicas (T_b y T_x) para el cálculo de los oD.	B-9
Figura B.7 Curvas de ajuste a la curva diaria observada para estimar $^{\circ}D$	B-11
Figura B.8 Concepto de horas grado desarrollo ($^{\circ}H$).	B-12
Figura C.1 Variación del factor de abatimiento (f) en función del parámetro α_3 definido por el sistema de riego.	C-7
Figura C.2 Curvas generadas por las ecuaciones del cuadro C.1 para el cultivo de papa (Ojeda-Bustamante et al., 2004)	C-8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura D.1 Plan de cultivos de diseño en los meses de máxima demanda hídrica.....	D-4
Figura D.2. Variación de la humedad del suelo para el cultivo de papa.	D-9
Figura D.3 Pantalla principal de CropWat para Windows v8.0 antes de cargar datos.	D-13
Figura D.4 Guardar la nueva sesión “Mochis.ses”.....	D-14
Figura D.5 Configuración de opciones de CropWat.....	D-15
Figura D.6 Configuración de método de calcular la precipitación efectiva.....	D-16
Figura D.7 Configuración de programación de riego para cultivos no inundados. D-17	
Figura D.8 Introducción de los datos climáticos.....	D-18
Figura D.9 Introducción de los datos de precipitación.	D-19
Figura D.10 Captura de parámetros del cultivo (papa).	D-20
Figura D.11 Captura del padrón de cultivos.....	D-21
Figura D.12 Captura de los parámetros del suelo en el sistema CropWat.	D-22
Figura D.13 Resumen del requerimiento de riego para cultivo de papa, Los Mochis. D-23	
Figura D.14 Resumen de programación del riego para el cultivo de papa, Los Mochis.	D-24
Figura D.15 Resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis.	D-25
Figura D.16 Gráfica de la temperatura mínima y máxima mensual para la estación de Los Mochis.	D-26
Figura D.17 Gráfica de la velocidad del viento y insolación mensual para la estación de Los Mochis.	D-26
Figura D.18 Gráfica de la evapotranspiración de referencia, precipitación total y efectiva mensual para la estación de Los Mochis.	D-27
Figura D.19 Gráfica de la evapotranspiración real y requerimiento de riego para papa.....	D-28
Figura D.20 Gráfica del programa de riegos y el déficit de humedad de agua en el suelo para papa.....	D-28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura E.1 Pantalla de inicio del software AquaCrop.....	E-5
Figura E.2 Operación y lógica en la simulación con el modelo AquaCrop, con la separación de la evaporación del suelo (<i>ES</i>), transpiración (<i>Tr</i>), rendimiento (<i>Y</i>), biomasa (<i>B</i>) e índice de cosecha (<i>Hi</i>). <i>WP</i> : productividad del agua y <i>Ky</i> : factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptado de Raes <i>et al.</i> , 2009a por Flores-Gallardo <i>et al.</i> , 2013).....	E-7
Figura E.3 Catálogo de cultivos integrados en el software del modelo AquaCrop.E-10	
Figura E.4 Interface para introducir la información de las diferentes variables requeridas para simular el rendimiento del cultivo en AquaCrop.....	E-11
Figura E.5 Selección de la modalidad agrícola: riego o temporal.	E-12
Figura E.6 Selección del sistema de riego a utilizar en la simulación del cultivo. .	E-13
Figura E.7 Visualización del calendario de riego simulado con respecto al cultivo (duración del ciclo del cultivo, clima, suelo, sistema de riego, densidad de población) con el modelo AquaCrop.	E-14
Figura E.8 Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (O-I y P-V).	E-17
Figura E.9 Simulación del dosel vegetal (<i>CC</i>) en porcentaje para la fecha de siembra del 05 de noviembre (ciclo agrícola O-I) bajo las tres condiciones de disponibilidad hídrica.	E-18
Figura E.10 Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a las tres condiciones de disponibilidad hídrica y fechas de siembra (ciclos O-I y P-V).....	E-19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición media de un suelo húmedo.....	14
Tabla 2.2 Dimensiones granulométricas de las partículas del suelo.....	14
Tabla 2.3 Variabilidad de los parámetros del suelo obtenidos a partir de muestras de suelo (Warrick, 1997).....	20
Tabla 2.4 Variación de la superficie específica (S_e) de partículas esféricas en relación con su radio, con M_s y V_s constantes, empaquetadas en un volumen de 1 m^3	25
Tabla 3.1 Densidad del agua en función de la temperatura.....	38
Tabla 3.2 Sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico (FAO, 1990).	41
Tabla 3.3 Periodos críticos al déficit hídrico de los cultivos.....	42
Tabla 3.4 Variación estacional del factor abatimiento hídrico (f) de algunos cultivos (SCS-USDA, 1991).....	43
Tabla 3.5 Constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas (porcentajes volumétricos).....	44
Tabla 3.6 Parámetros del suelo obtenidos de muestras superficiales de suelos agrícolas (Marshall y Holmes, 1988).	45
Tabla 3.7 Conversiones útiles en la medición del agua	49
Tabla 3.8 Profundidad de mojado al aplicar una lámina de 1 cm en diferentes suelos de la <i>tabla 3.5</i> . Las unidades de la humedad son en porcentaje.....	52
Tabla 3.9 Valores de la humedad aprovechable (mm/m) en función de la tensión del suelo (Rijtema, 1969).....	56
Tabla 3.10 Valores del potencial del agua para el sistema suelo-agua-atmósfera.....	58
Tabla 3.11 Potencial del agua (a 25°C) a diferentes humedades relativas	58
Tabla 3.12 Parámetros de la ecuación de infiltración acumulada de acuerdo al Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.....	61
Tabla 3.13 Coeficientes de uniformidad potenciales (PU_d) en porcentaje, para sistemas de riego bien diseñados y un valor de $P = 0.25$	65
Tabla 3.14 Eficiencias de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm.....	68
Tabla 4.1 Coeficientes de la línea base (α_1 y α_2) para cultivos no estresados usando la ecuación 4.2. Reportados por Hanson et al., 1999 para California, USA.	92
Tabla 4.2 Valores mínimos de la tensión mátrica (h_c) del suelo sin problemas de salinidad para definir el momento del riego en varios cultivos.....	102
Tabla 4.3 Equivalencias de unidades de presión y lámina (psi se refiere a libras por pulgada cuadrada).....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Evapotranspiración de referencia ETo en mm d-1 para diferentes regiones agroclimáticas (adaptado de Allen et al., 1998).....	138
Tabla 5.2 Datos meteorológicos requeridos por los métodos de evapotranspiración recomendados por la FAO de acuerdo a la disponibilidad climática (Doorenbos y Pruitt,1977).	141
Tabla 5.3 Comparación de varios métodos para estimar la evapotranspiración de referencia tomando como referencia datos de 11 lisímetros alrededor del mundo (Jensen et al., 1990).....	143
Tabla 5.4 Equivalencias de unidades relacionadas con la evapotranspiración. ...	149
Tabla 5.5 Rangos de variación de la evapotranspiración de los principales cultivos durante su ciclo fenológico (Doorenbos y Pruitt, 1977).	149
Tabla 5.6 Coeficientes de cultivo (Kcb) para varios cultivos para la región norte de Sinaloa, México.	155
Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo para algunas hortalizas sembradas en el estado de California (USA) en función del ancho del follaje y ancho de cama (Hanson et. al., 1999).....	157
Tabla 5.8 Requerimientos netos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el Valle del Carrizo. Ln es lámina neta parcelaria.	162
Tabla 5.9 Factor de mojado (Fm) para diferentes sistemas de riego (Martin et al.,1990).....	163
Tabla 5.10 Valores típicos de tiempos de secado (td) y el factor de persistencia (Pf) para suelos agrícolas (Hill et al., 1983).....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1 Densidad radical de cebada y trigo para diferentes tipos de raíces (Wild, 1993).	178
Tabla 6.2 Profundidad efectiva aproximada de los principales cultivos agrícolas (FAO, 1990).	183
Tabla 6.3 Profundidad efectiva de exploración de las raíces (cm) de acuerdo a la textura del suelo (Palacios, 1998).	183
Tabla 6.4 Influencia de la profundidad máxima del suelo en la productividad (PPI, 1994).	186
Tabla 6.5 Número de curva (CN _{II}) de escurrimiento para diferentes complejos hidrológicos suelo-cobertura para un contenido de humedad antecedente tipo II y I _a = 0.2S.	189
Tabla 6.6 Grupos de suelos hidrológicos.	190
Tabla 6.7 Tipos de contenidos de humedad antecedente previa (CHA).	190
Tabla 6.8 Parámetros del modelo de Gardner para la conductividad hidráulica para diferentes suelos reportados por Amoozegar-Fard et. al., 1984.	192
Tabla 6.9 Tolerancia a la salinidad de algunos cultivos agrícolas, en términos de conductividad eléctrica (CE), en función del rendimiento esperado (en porcentaje con respecto al rendimiento máximo potencial).	195
Tabla 6.10 Capacidad de descarga diaria requerida (Q _a) en l s ⁻¹ por hectárea según ecuación (6.49).	203
Tabla 6.11 Valores del coeficiente K para diferentes unidades usadas en la ecuación (6.56).	206
Tabla 6.12 Lámina bruta en cm, aplicada en función del gasto y tiempo de riego.	207
Tabla 6.13 Intensidad de aplicación en pulgadas por hora en función del espaciamiento entre aspersores y el gasto de aplicación del aspersor.	211
Tabla 6.14 Valores del parámetro K _y para algunos cultivos agrícolas (Doorembos y Kassan, 1986).	213
Tabla 6.15 Láminas netas (L _n) de riego en función de la fecha de siembra para el maíz en el DR076.	213
Tabla 6.16 Requerimientos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el DR076.	214
Tabla 7.1 Principales variables climática y sensores para determinar el momento del riego (Bringas, 2003)	232
Tabla 7.2 Humedad del aire en diferentes unidades. (Nederhoff, 2001)	235
Tabla 7.3 Principales características físicas y químicas del tezontle. (Burés, 1997)	252

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1. Requerimientos hídricos totales (netos y brutos) de los principales cultivos en el norte de Sinaloa en función del tipo de sistema de riego.....	260
Tabla 8.2. Consumo de agua promedio (ET_r) por etapa fenológica para una variedad típica sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa con requerimientos a madurez de 1451 °D.....	262
Tabla 8.3. Calendario de riego en maíz con riego por gravedad.....	263
Tabla 8.4. Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal).	263
Tabla 8.5. Requerimientos de riego de siembra a madurez fisiológica del maíz en diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte.....	264
Tabla 8.6. Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua.....	265
Tabla 9.1. Coeficientes de cultivos utilizados para la aplicación de láminas de riego en chile habanero y tomate de cáscara.	278
Tabla 9.2. Requerimientos de riego (RR) a nivel mensual y diario para el cultivos hortícolas a partir de datos basados en coeficientes de cultivos (Kc) propuesto por la FAO sin cubierta plástica y datos climáticos de una estación climatológica de Cárdenas, Tabasco.	279
Tabla 9.3. Efecto de la fecha de trasplante, variedad y ciclo en el rendimiento de frutos y la productividad de agua de riego para chile habanero con riego por goteo y cubierta plástica en suelos Fluvisoles de Huimanguillo, Tabasco.....	281
Tabla 9.4. Láminas de riego, precipitación y eficiencia del agua de riego en el cultivo de chile habanero y tomate verde con riego por goteo con y sin cubierta plástica.	284
Tabla A.2. Alturas estándares de instalación de sensores usados por cuatro organismos internacionales y nacionales, y en cinco de las “grandes” redes nacionales de estaciones automatizadas en los E. U. A. También incluye las alturas de referencia recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) para ECA usadas para el monitoreo general del clima y del medio ambiente y en agrometeorología (traducción de la versión original en inglés. Según Meyer y Hubbard, 1992, con datos adicionales para la FAO, de Doorenbos, 1976).	A-7
Tabla A.3 Alturas estándares de instalación de sensores usados por la RAN.	A-11
Tabla A.4 Resumen de precisiones requeridas para medidas superficiales para fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas (ECA; adaptación y traducción de la versión original en inglés de partes seleccionadas de las tablas 2 y 4 en WMO, 1983).....	A-16
Tabla A.5. Distancia de influencia “vientos arriba” (m) que contribuye el 50 o el 80 por ciento del flujo para diferentes alturas de medición (m) y factores de rugosidad z_0 (m) bajo condiciones de estabilidad neutral. Los factores de rugosidad son 0.13 veces la altura de la cubierta vegetal (Leclerc y Thurtell, 1990).....	A-17
Tabla A.6. Plan de mantenimiento técnico para las ECA de la RAN.....	A-21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla B.1 Grados Día ($^{\circ}$ D) requeridos por etapa para maíz de ciclo intermedio en el norte de Sinaloa, México. B-13

Tabla C.1 Descripción de los modelos con parámetros para expresar las variables de calendarización del riego..... C-7

Tabla C.2 Parámetros de calendarización del riego para papa C-8
(Ojeda-Bustamante et al., 2004). C-8

Tabla C.3 Parámetros de calendarización del riego obtenidos para el cultivo de maíz bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua..... C-9

Tabla C.4 Calendario de riego en maíz bajo riego por gravedad C-10

Tabla C.5 Calendario de riego en maíz bajo por aspersión móvil (avance frontal) C-10

Tabla D.1 Distribución de las fechas de siembra (FS), cosecha (FC), duración del ciclo (DC), Profundidad de Raíces (Pr), factor de abatimiento (f) y superficie (A) para el plan de cultivos propuesto. D-4

Tabla D.2 Datos geográficos de la estación meteorológica. D-5

Estación..... D-5

Los Mochis D-5

Tabla D.3 Datos promedios para un día típico del mes para la estación de los Mochis, Sinaloa, México. D-5

Tabla D.4 Valores diarios típicos mensuales de ETo (mm/día) para Los Mochis, Sinaloa..... D-6

Tabla D.5 Precipitación mensual acumulada promedio (mm) y diaria (mm/día) observada para Los Mochis, Sinaloa..... D-6

Tabla D.6 Parámetros para la programación del riego en la zona de riego de Los Mochis, Sinaloa. D-6

Tabla D.7 Parámetros promedio de los suelos del Valle del Fuerte, Sinaloa. D-7

Tabla D.8 Requerimientos de riego para el periodo para el cultivo de papa. D-8

Tabla D.9 Programa de riego para el cultivo de papa con fecha e intervalo de riego, y requerimientos de riegos netos y brutos. D-8

Tabla D.10 Programa de riego para el plan de cultivos propuesto..... D-10

Tabla D.11 Tabla exportada de CropWat con resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis. D-29

Tabla E.1 Mejoras y adición de nuevos cultivos del modelo AquaCrop a partir de su liberación. E-6

Tabla E.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop. E-15

Tabla E.3 Datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V (2007-2008 y 2008-2009). E-16

Tabla E.4 Resultados medidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop. E-16

Tabla E.4 Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos O-I y P-V de acuerdo a las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y fecha de siembra. E-18

“En muchos países el riego es un arte antiguo, tanto como la civilización, pero para la humanidad es una ciencia, la de sobrevivir”

O.W. Israelsen

La importancia de la calendarización del riego



1

CAPITULO 1

LA IMPORTANCIA DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauricio Carrillo García

1.1 IMPORTANCIA DEL RIEGO

Los recursos hidráulicos son indispensables para el desarrollo de un país. De hecho, los problemas asociados con el agua son una creciente preocupación nacional y mundial. Estos problemas tienen repercusiones sociales, económicas y políticas, que se han incrementado en las últimas décadas y se agravan durante los periodos de sequía que azotan a las zonas áridas y semiáridas, generando un desequilibrio entre los recursos disponibles y las demandas de agua para uso agrícola, urbano, ambiental e industrial.

La precaria disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas constituye la limitante principal para la producción de granos y para la apertura de nuevas áreas de cultivo. Al incrementarse la población, la competencia por el agua se intensifica, siendo necesarios la conservación y el uso eficiente de este recurso mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos, tanto para distribuir y aplicar el agua de riego, como para evaluar y controlar el estado hídrico en la zona de raíces del cultivo.

México cuenta con alrededor de 20 millones de hectáreas cultivables. En la tercera parte de ellas se practica el riego, y en éstas se genera el 50% de la producción agrícola nacional y el 70% de las exportaciones agrícolas. Las zonas de riego tienen una productividad de aproximadamente del 230% con respecto a la obtenida en las áreas de temporal o secano (CNA, 1994).

En México, existen varios distritos de riego por bombeo localizados en zonas áridas, donde las extracciones de los acuíferos son mayores que sus recargas. Por ejemplo, en el Distrito de Riego 037, localizado en Caborca, Sonora, se ha observado un abatimiento del manto freático de cerca de 22 m de 1970 a 1996, con un abatimiento promedio anual de 80 cm. Lo anterior ha propiciado la búsqueda de mejores metodologías y tecnologías para aplicar, conducir y medir el agua usada, pero sobre todo para estimar en forma oportuna y confiable la calendarización del riego de los cultivos.

Para optimizar los recursos hídricos de una área de riego es importante conocer la cantidad de agua que consumen los cultivos a lo largo de sus diferentes fases fenológicas, a fin de suministrarla a través del riego en forma calendarizada, que permita reponer el agua consumida por la transpiración de las plantas y la evaporación

del suelo. La suma de estas cantidades se le conoce integralmente como evapotranspiración (ET).

Existen varios factores que afectan el rendimiento de los cultivos; entre los más importantes relacionados con el riego son:

- Clima
- Variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo
- Especie y variedad cultivada
- Método de aplicación del riego

A continuación se analizan algunos de estos factores, los demás son tratados en detalle en otros capítulos.

Existe una relación casi lineal entre el rendimiento de un cultivo y la evapotranspiración ($R - ET$) tal como se muestra en la **Figura 1.1**. En la relación rendimiento-riego ($R - L$) existen dos zonas. En la primera, a medida que se incrementa el volumen de riego aplicado, ya que toda el agua aplicada se almacena en la zona de raíces, también se incrementa linealmente el rendimiento, la relación $R - L$, coincide con la relación $R - ET$, hasta que se alcanza un valor máximo, a partir del cual el rendimiento ya no se incrementa linealmente y la pendiente de la curva disminuye gradualmente hasta aproximarse a una pendiente cero (línea horizontal). En esta zona la pendiente depende de la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico. A mayor sensibilidad del cultivo al estrés se tiene una mayor pendiente de la relación $R - L$. En la segunda zona la pendiente de $R - L$ depende principalmente de la eficiencia del método de aplicación del riego. En riego por gravedad existe una mayor desviación de la relación $R - L$, respecto a la relación lineal $R - ET$, que bajo riego por aspersión, la razón principal es el porcentaje del agua aplicada por riego superficial se mueve fuera de la zona de raíces. Se requiere mayor cantidad de agua al regar por gravedad que al regar por aspersión, para compensar las pérdidas de agua por baja eficiencia.

La **Figura 1.1** presenta gráficamente la variación del rendimiento en función de la lámina aplicada. Se requiere de un valor mínimo de lámina para obtener rendimientos significativos, por lo que la recta $R - ET$ se mueve a la derecha en función de la parte cosechable del cultivo ($L > 0$, $R = 0$). Se requiere de una lámina mínima para obtener rendimientos. Para el caso de la alfalfa, por ejemplo, donde la mayor parte del cultivo es cosechado la relación $R - L$ inicia cercano a los valores $L = 0$, $R = 0$, tal como se muestra en la **Figura 1.1**. Un valor de uno de la relación R_r / R_m implica que el rendimiento real (R_r) es igual al rendimiento potencial máximo (R_m). Un valor de uno de la relación L_b / L_n implica que la lámina de riego bruta (L_b) es igual a la lámina neta requerida (L_n) para satisfacer los requerimientos evapotranspirativos del cultivo. La sección derecha de la **Figura 1.1** muestra diferentes curvas $R-L$, las curvas inferiores son para sistemas de riego con bajas eficiencias de aplicación.

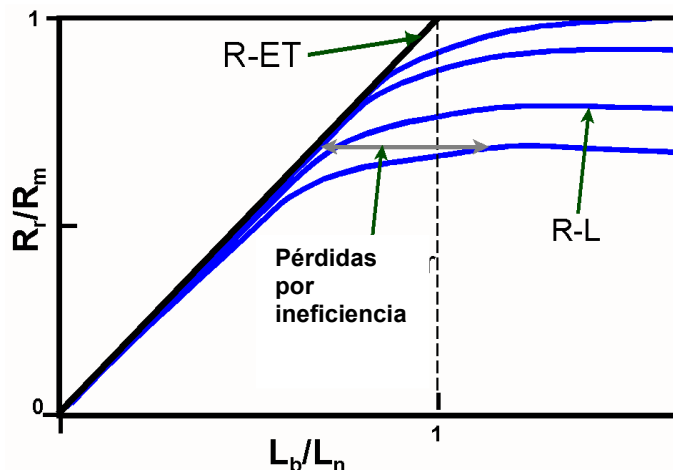


Figura 1.1 Rendimiento normalizado en función de la lámina aplicada normalizada. R_r es el rendimiento real, R_m es el rendimiento máximo potencial, L_b es la lámina bruta aplicada y L_n la lámina neta requerida.

La disponibilidad de humedad es uno de los factores más importantes que afectan el rendimiento de los cultivos. El rendimiento depende en gran medida de como se programa el riego en las diferentes etapas fenológicas del cultivo. La **Figura 1.2** muestra una curva ideal del efecto del contenido de humedad sobre el rendimiento. Para altos contenidos de humedad (casi saturación), el rendimiento se ve afectado por una reducción del oxígeno disponible en la zona de raíces. El otro extremo se presenta bajo un suelo seco, donde la planta utiliza gran cantidad de energía para extraer la poca humedad disponible, retenida fuertemente por las partículas del suelo.

En general, el contenido de humedad en el suelo no es el óptimo, sin embargo, debe estar por arriba de un valor crítico (θ_c), en el cual, la planta muestra síntomas de estrés que se traducen en una reducción de la calidad y cantidad de la cosecha, tal como se muestra en la **Figura 1.2**. Es difícil determinar el valor óptimo del contenido de humedad y más difícil aún mantenerlo durante un periodo de tiempo largo. La **Figura 1.2** muestra curvas ideales para dos cultivos con diferentes contenidos críticos de humedad del suelo: un cultivo sensible (θ_{c1}) y otro resistente a la sequía (θ_{c2}). Los valores extremos del contenido de humedad: θ_{CC} y θ_{PMP} , son parámetros del suelo conocidos como humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente, que posteriormente se analizan a detalle en el capítulo 3.

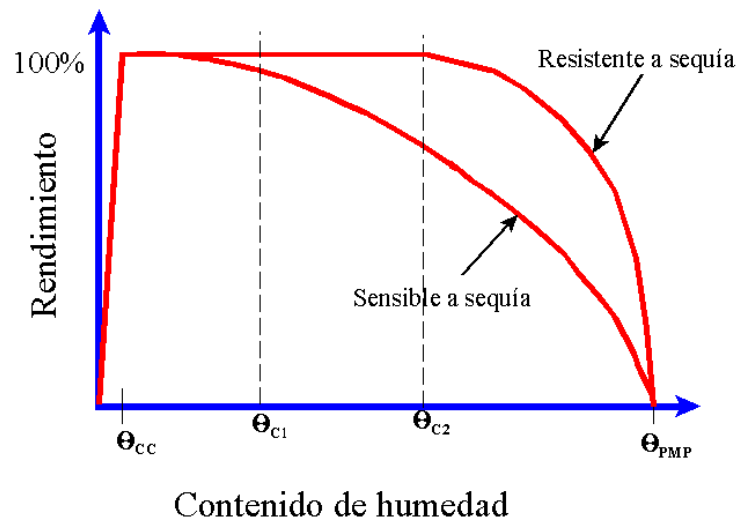


Figura 1.2 Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento de dos cultivos bajo condiciones de estrés hídrico.

En general, es sumamente difícil proveer simultáneamente a las raíces de sus requerimientos de agua, nutrientes y oxígeno. Cuando el suelo se satura, los nutrientes solubles y el agua se encuentran disponibles en grandes cantidades pero el oxígeno tiende a ser el factor limitante; a medida que el suelo se va drenando y secando, las cantidades de oxígeno y humedad pasan por una zona óptima, y el agua pasa a ser finalmente un factor limitante. Como la mayoría de los nutrientes que se necesitan se absorben en forma iónica, el agua condiciona también su absorción por las raíces.

1.2 DEFINICIÓN DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Para definir la calendarización del riego es primordial tomar en cuenta los objetivos del productor: maximizar ganancias y rendimiento; minimizar costos de riego, minimizar percolación profunda, minimizar energéticos, etc. Existen varios criterios para calendarizar el riego, algunos dependen de la disponibilidad de agua y de la superficie a cultivar. Cuando la superficie regable es limitada y el agua es suficiente, el riego se calendariza basado en la máxima producción por unidad de área. Cuando ambos recursos son limitados, la optimización se realiza maximizando la producción por unidad de lámina aplicada por unidad de área. Si se presentan restricciones adicionales, como es el caso de suelos con problemas de sales, la calendarización se modifica para facilitar labores culturales de control del manto freático y aplicación de láminas de lavado.

La calendarización del riego se define como el procedimiento para determinar la cantidad y fecha de aplicación del riego a un cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico a fin de mantener al cultivo bajo condiciones hídricas óptimas. Lo anterior

incluye cantidades adicionales de agua para el control de sales, heladas, plagas y enfermedades.

La calendarización o programación del riego es una técnica o metodología para definir cuándo iniciar y terminar el riego, es decir, cuándo y cuánto regar para mantener el cultivo bajo un estrés hídrico mínimo y así evitar una reducción en su rendimiento. Para lograr tal fin, el contenido de humedad del suelo debe mantenerse dentro de un rango óptimo, tal como se muestra en la **Figura 1.3**. Cuando el contenido de humedad alcanza un valor crítico inferior (θ_c) se aplica el riego para reponer la humedad perdida hasta alcanzar un límite superior, dado usualmente por la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo, que se manifiesta con posterioridad a la aplicación del riego, cuando el drenaje ha cesado; a este estado se le conoce como contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}). Si los requerimientos de riego de un cultivo son sobrestimados, los costos no son sólo económicos (dados por mayores necesidades de agua y energía de bombeo), sino también ambientales (mayor probabilidad de que los agroquímicos disueltos en el agua, emigren a cuerpos de agua superficiales o subsuperficiales).

Es conveniente mencionar que una parte importante de los agroquímicos disueltos en agua se mueven a donde el agua se mueve, como es el caso de los fertilizantes nitrogenados que representan una amenaza ambiental cuando están fuera del alcance de las raíces.

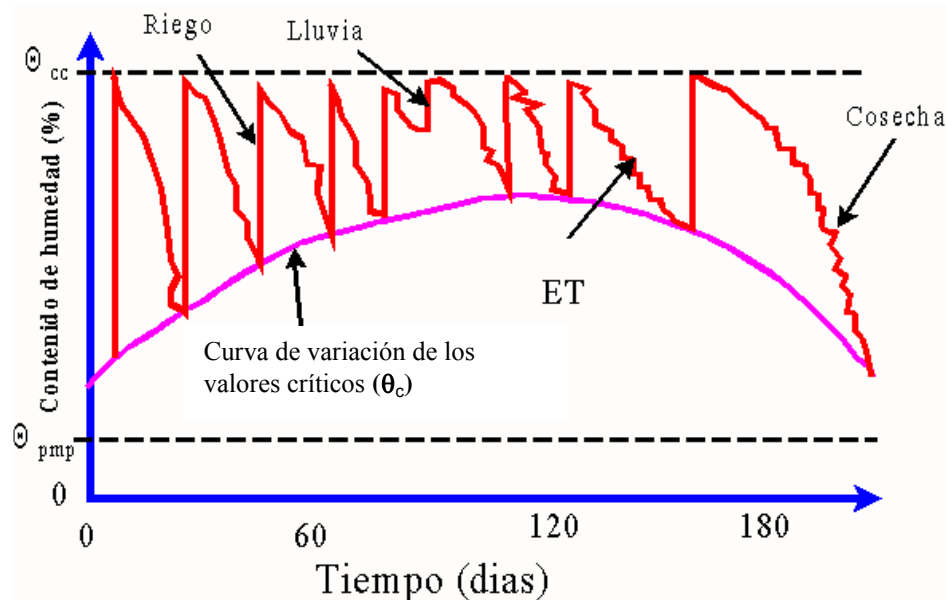


Figura 1.3 Variación del contenido de humedad durante el ciclo fenológico de un cultivo.

La calendarización del riego es una tarea compleja que requiere información de las condiciones representativas de las parcelas, es decir, datos históricos, actuales y predecibles a corto plazo sobre el clima, suelo, calidad y cantidad de agua y sistemas de riego, todo con el propósito de ajustar la calendarización a las características

particulares de la zona de riego. Una parte importante del proceso de calendarización del riego es estimar las pérdidas de agua que se mueven fuera del alcance de las raíces por una deficiente aplicación del agua. La **Figura 1.4** muestra el riego por inundación sin un control en su aplicación, bajo este método de aplicación del agua es muy difícil aplicar el riego en forma uniforme y en consecuencia la lámina aplicada es muy irregular. Bajo este método se tienen que aplicar grandes cantidades de agua por arriba de las requeridas por el cultivo.



Figura 1.4 Riego por inundación sin control

Diferentes tipos de calendarización de riego han sido propuestos en la literatura (Martin *et al.*, 1990), los cuales se clasifican en tres grandes grupos basados en:

- Balance de humedad del suelo usando un estimador de la evapotranspiración de los cultivos.
- Verificación del estado hídrico del suelo (humedad y tensión del agua en el suelo).
- Verificación del estado hídrico de algún órgano de la planta.

Cada una de las metodologías anteriores se discute a detalle en capítulos posteriores. El método del balance hídrico es el más usado en zonas de riego grandes y medianas. El método de balance de humedad del suelo se centra alrededor de la ecuación de balance de humedad en la zona radical de las plantas. La ecuación involucra la estimación diaria de las entradas y salidas de agua, en un volumen de control conformado por la zona de raíces, para realizar una estimación indirecta del contenido de humedad del suelo. El método de balance de humedad se asemeja al balance de una cuenta bancaria, donde se tienen entradas y salidas de dinero, es posible conocer el estado de la cuenta en cualquier momento sin necesidad de llamar

al banco, siempre y cuando se conozcan los movimientos u operaciones de dinero realizadas.

En este libro se presentan los principios necesarios y los métodos más usados para calendarizar el riego a nivel parcela, invernadero o planta, con aplicaciones a cultivos de interés o sistemas de producción especializados como es el caso de invernaderos.

*“Sólo el agua puede desahogar a la tierra”
Gastón Bachelard*

Caracterización de los suelos



2

CAPITULO 2

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Waldo Ojeda Bustamante, Abraham Rojano Aguilar y Mauro Iñíguez Covarrubias

2.1 FUNCIÓN DEL SUELO

El suelo es un sistema complejo y dinámico de la capa superficial terrestre, relativamente delgado, de material disperso que se encuentra sobre la litosfera. De este material depende el crecimiento de las plantas y la alimentación de los seres vivos.

En el suelo se realiza un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos que producen cambios continuos de la fertilidad del mismo, que pueden enriquecerlo o empobrecerlo, afectando las funciones que desempeña en beneficio de las plantas que soporta. Entre las funciones deseables de mayor importancia que el suelo debe tener (algunas relacionadas con la calendarización del riego), están las siguientes:

- Medio de anclaje de las raíces y soporte mecánico para el tallo y follaje.
- Almacenamiento y suministro de agua para las plantas.
- Almacenamiento y suministro de los nutrientes esenciales para las plantas.
- Suministro de oxígeno y remoción del bióxido de carbono producido.
- Transporte de calor, que permite mantener una temperatura adecuada para el desarrollo de las raíces y la germinación de semillas.
- Generación de un ambiente propicio para los cultivos, libre de patógenos y parásitos, con bajos niveles de iones tóxicos y sales.

2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO

El suelo es un estrato de partículas de rocas con diferente escala granulométrica, mezcladas con sustancias de origen orgánico. Debido a su formación y origen, el suelo presenta una composición que no es desordenada, sobre todo en suelos maduros o desarrollados que tienen una estructura y composición bien definida. Varios niveles estructurales están asociados con los suelos, entre los cuales destacan los siguientes:

- El suelo es un sistema polifásico compuesto por las fases: sólida, acuosa y gaseosa. **La Tabla 2.1** muestra la composición media de un suelo húmedo.
- Las distintas fracciones texturales que componen los estratos u horizontes que definen el perfil del suelo.

- Las partículas del suelo están agregadas en una estructura definida, formando así horizontes identificables.

Tabla 2.1 Composición media de un suelo húmedo.

FRACCIÓN	PORCENTAJE
Mineral	45
Orgánica	5
Acuosa	25 [†]
Gaseosa	25 [†]

[†] Los porcentajes de saturación de la fracción porosa pueden variar, dependiendo del contenido de humedad del suelo.

La fase sólida proviene principalmente de la intemperización de rocas y residuos vegetales. Esta fase es relativamente estable en su composición y organización, mientras que las otras dos fases (líquida y gaseosa) están en cambio constante debido a los diferentes procesos que ocurren en el suelo (como la redistribución, evaporación y la absorción del agua por las plantas), a la reposición periódica del agua por la lluvia o riego, a la difusión de gases y al desplazamiento masivo del aire en el estrato superior del suelo, lo cual puede generar una renovación del aire presente en los poros varias veces durante el día.

2.3 PROPIEDADES DEL SUELO

Los suelos poseen varias propiedades estáticas y dinámicas, que los caracterizan y diferencian, con una variabilidad espacial y temporal. A continuación se presentan las propiedades más importantes de los suelos relacionadas con el riego:

- Textura.
- Materia Orgánica (MO).
- Densidad aparente (ρ_a).
- Densidad de partículas (ρ_s).
- Porosidad del suelo (ε).
- Superficie específica (S_e).
- Estructura.
- Perfil del suelo.

Tabla 2.2 Dimensiones granulométricas de las partículas del suelo.

Partícula	Dimensiones (mm)
Arena	2 - 0.05
Limo	<0.05 - 0.002
Arcilla	<0.002

2.3.1 Textura

La textura de un suelo se define con respecto al tamaño de las partículas que lo conforman, las cuales se clasifican en tres clases, de acuerdo con su tamaño: arena, limo y arcilla. La **Tabla 2.2** resume las dimensiones para clasificar las partículas del suelo, de acuerdo a la clasificación más usada, la propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Desde el punto de vista de tamaño, la arcilla prácticamente es insignificante con respecto a la arena, sin embargo, su presencia está asociada con una gran diversidad de procesos de interés agrícola que ocurren en el suelo. La **Figura 2.1** compara gráficamente, a escala, las dimensiones de los tamaños de las partículas texturales. Para clasificar los suelos se han propuesto diferentes clasificaciones. La **Figura 2.2** muestra el triángulo para definir las 12 clases texturales de los suelos en función de los porcentajes de las fracciones granulométricas del suelo (arcilla, limo, y arena).

Si un suelo tiene mayor porcentaje de una fracción textural respecto de las otras, será la fracción dominante quien defina la textura del suelo. Por ejemplo, un suelo con más del 60% de arcilla se define como de textura arcillosa. Cuando un suelo tiene proporciones similares de las tres fracciones texturales se dice que tiene una textura franca o migajonosa. Los mejores suelos agrícolas son los suelos francos ya que presentan propiedades intermedias con relación a su capacidad de drenaje y aeración, retención de humedad y nutrientes.

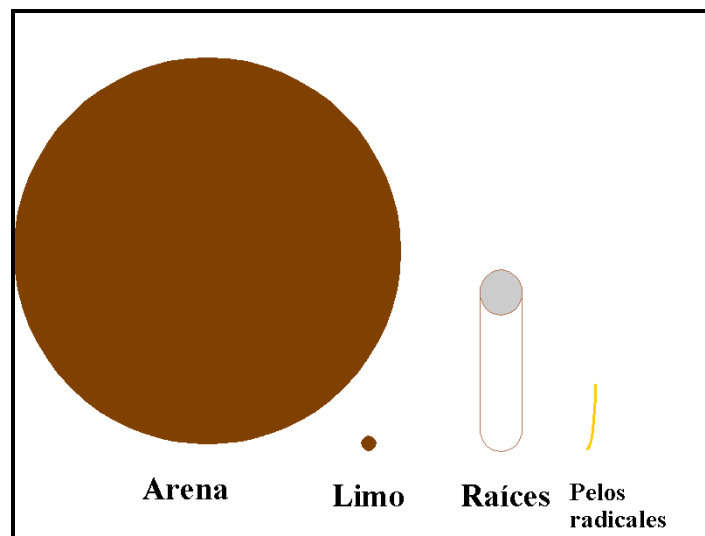


Figura 2.1 Comparación del tamaño de partículas del suelo y raíces.

A las arcillas que no pueden observarse con un microscopio ordinario se les conoce como coloides y representan el máximo nivel de división que pueden alcanzar

las partículas del suelo. Por sus características iónicas, los coloides son de vital importancia en la fertilidad de un suelo.

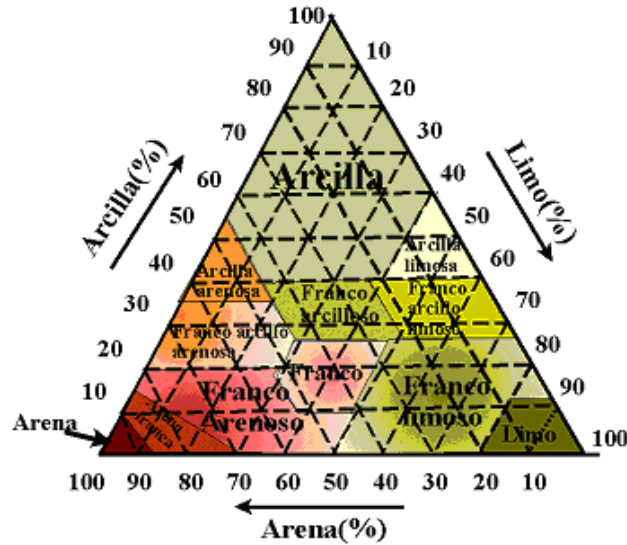


Figura 2.2 Triángulo de texturas.

2.3.2.1 Métodos para estimar la textura

En los métodos más usuales para estimar las fracciones texturales del suelo se asume un tamaño de partícula equivalente, en lugar de usar una descripción precisa de las partículas del suelo. Existen dos procedimientos de separación de partículas del suelo: el cribado y la sedimentación.

El cribado consiste en separar las fracciones texturales empleando un tamiz o criba para separar las partículas gruesas (arena) de las finas (arcilla y limo) usando el tamaño de malla correspondiente (0.05 mm). La parte que queda sobre la malla se utiliza para calcular la fracción arenosa, y el resto pasa por un proceso de sedimentación.

La sedimentación es utilizada para estimar la cantidad de partículas de arcilla y limo de la cual existen dos métodos: pipeta e hidrómetro. El principio de estimación se basa en la Ley de Newton (gravedad), el principio de Arquímedes (flotación) y la ley de Stokes (fricción). Asumiendo que las tres fuerzas que actúan sobre una partícula se encuentran en equilibrio durante el proceso de sedimentación, se obtiene la siguiente ecuación para determinar la velocidad de caída de las partículas:

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2 g}{18\mu} \quad (2.1)$$

Donde v es la velocidad de caída de las partículas del suelo (LT^{-1}), d es el diámetro de las partículas (L), g es la aceleración gravitacional ($L T^{-2}$), ρ_s es la densidad

de las partículas (ML^{-3}), ρ_f es la densidad del fluido (ML^{-3}) y μ la viscosidad del fluido ($\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$).

La ecuación anterior estima la velocidad de una partícula esférica de diámetro d y densidad ρ_s cayendo en un fluido de densidad ρ_f y viscosidad μ . Si se tiene una suspensión perfectamente mezclada con partículas de suelo de tamaños variables, las partículas caen al fondo del recipiente en diferentes tiempos con velocidades proporcionales al cuadrado del diámetro de partícula.

Por ejemplo, después de 100 s de que la suspensión se ha agitado, todas las partículas de diámetro d mayor que 0.005 cm habrán caído una distancia mayor o igual a $h = v \cdot t = (0.281)(100) = 28.1$ cm, donde $v = 0.281 \text{ cm s}^{-1}$ es el valor de la **ecuación (2.1)** cuando $d = 0.005$ cm y asumiendo que $\rho_f = 1 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho_s = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$, $g = 981 \text{ cm s}^{-2}$, y $\mu = 0.008 \text{ g cm}^{-1}\text{s}^{-1}$. En consecuencia, al tiempo $t = 100$ s no habrá partículas de suelo con diámetro mayor de 50 μm entre la superficie y a una profundidad $h=28.1$ cm de la suspensión. Si se obtiene una muestra de la suspensión en los 28.1 cm, superiores, a los 100 s después de agitar la solución, la solución contendrá solamente partículas menores de 50 μm , que corresponden a partículas de arcilla y limo.

En el método del hidrómetro se coloca un objeto flotante precalibrado (hidrómetro) que se sumerge poco a poco en la suspensión, ya que las partículas de suelo se sedimentan y, en consecuencia, la densidad cambia con la profundidad y el tiempo. La posición del hidrómetro, con respecto a la superficie de la suspensión, a un tiempo dado puede ser usada con una curva de calibración del dispositivo para calcular la densidad de la solución y, en consecuencia, la masa de las partículas para un rango de tamaños de partículas que se encuentran a la profundidad a la cual fue hecho el muestreo.

El método de la pipeta consiste en hacer muestreos de la suspensión del suelo a tiempos y profundidades predefinidos en función de los tamaños de partículas presentes en la suspensión.

2.3.2 Materia orgánica (MO)

La materia orgánica consta de residuos animales y vegetales en varios estados de descomposición, los cuales están sujetos a una continua degradación por parte de los microorganismos del suelo. La diversidad y cantidad de los microorganismos están ligadas a la productividad del suelo. La materia orgánica tiene los siguientes efectos sobre el suelo desde el punto de vista agrícola:

- Actúa como material cementante en la formación de nuevos agregados,
- Incrementa la infiltración en el suelo,
- Disminuye la erodabilidad de un suelo,
- Incrementa la capacidad de retención de agua y nutrientes, de gran importancia en la nutrición vegetal,

- Facilita las labores de labranza,
- Disminuye la resistencia del suelo a la penetración de las raíces.

La forma más común de expresar el contenido de materia orgánica es como el porcentaje que representa el peso de la materia orgánica con respecto al peso seco de la muestra de suelo. El contenido de materia orgánica en los suelos agrícolas varía de 0.5 a 5%. La **Figura 2.3** muestra la variación típica de la materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola, concentrándose en el estrato superior.

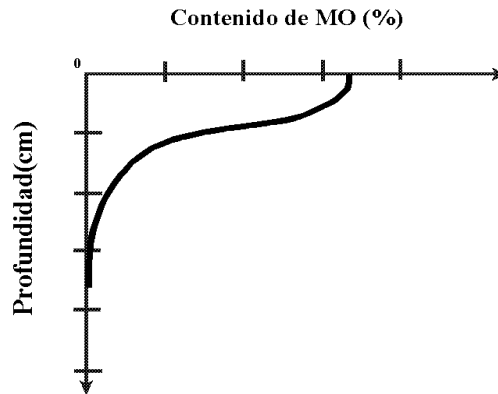


Figura 2.3 Variación típica del contenido de materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola.

La capa de suelo de 15 cm de espesor de una parcela con una superficie de una hectárea, pesa aproximadamente 2000 toneladas. Para un contenido de materia orgánica del 1%, dicha capa de suelo tiene 20 toneladas de materia orgánica. Considerando que en el mejor de los casos por cada 5 kg de residuo vegetal que se adicionan al suelo solamente se produce un kilogramo de materia orgánica (el 20%), el resto forma parte de la microfauna o se libera en forma gaseosa durante el proceso de descomposición realizado por los microorganismos. Si se requiere aumentar en 1% el contenido de materia orgánica al suelo, se requieren alrededor de 100 toneladas de residuos vegetales. Si al finalizar un ciclo agrícola se dejan alrededor de 5 toneladas de residuos vegetales por hectárea, se requerirán 20 ciclos para incrementar en un 1% el contenido de materia orgánica.

2.3.3 Densidad aparente (ρ_a)

La densidad aparente de los suelos es la relación entre la masa de sólidos (M_s) y el volumen total (V_t) del suelo y estimada por la siguiente relación:

$$\rho_a = \frac{\text{masa de la muestra seca}}{\text{volumen total de la muestra}} = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.2)$$

Como la densidad aparente considera el espacio poroso del suelo existente entre las partículas sólidas, entonces los valores altos indican suelos compactados con problemas para la penetración del agua, aire y raíces. El valor de esta propiedad del suelo oscila entre 1 g cm^{-3} para suelos orgánicos y hasta 1.9 g cm^{-3} en suelos arenosos compactados. El rango típico de ρ_a para suelos agrícolas es de $1.2\text{-}1.8 \text{ g cm}^{-3}$, con un promedio general de 1.4 g cm^{-3} . Suelos arenosos tienen una densidad aparente entre 1.2 y 1.8 g cm^{-3} , mientras que suelos finos, como los arcillosos, limo-arcillosos y franco-arcillosos, tienen valores de ρ_a entre 1 y 1.6 g cm^{-3} . En el distrito de riego 076 "Valle del Carrizo", Sinaloa, se encontró un valor de ρ_a promedio de 1.2 g cm^{-3} .

Es común referirse a los suelos arcillosos como pesados y a los arenosos como ligeros, sin embargo, no se refiere al sentido de peso, ya que los suelos arenosos por tener menor porosidad son más pesados que los arcillosos. Se refiere a otras propiedades del suelo (plasticidad, consistencia, cohesión y adhesión) relacionadas a la operabilidad del suelo para su labranza.

Un valor aproximado de ρ_a puede ser obtenido indirectamente conociendo la clase textural del suelo, con el fin de detectar problemas de compactación y tener una idea general de la condición agrícola del suelo. Los valores varían debido al grado de desarrollo del suelo y a las labores culturales. Los suelos arenosos presentan mayor densidad aparente que suelos arcillosos, debido a su menor porosidad. El valor de la ρ_a no es constante y puede variar temporal y espacialmente, siendo la capa arable la zona más dinámica.

Ejemplo. Si se tiene una muestra cúbica de suelo con dimensiones $20 \times 20 \times 15$ cm, la cual fue secada, resultando en un peso seco final de 8100 g , la densidad aparente de la muestra de suelo es:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t} = \frac{8100 \text{ gr}}{(20)(20)(15) \text{ cm}^3} = 1.35 \text{ gr cm}^{-3}$$

Donde M_s es el peso seco final y V_t es el volumen total

El incremento de la densidad del suelo tiene asociados los siguientes problemas del sistema radical del cultivo:

- Incremento de la resistencia del suelo a la penetración de las raíces.
- Reducción en el suministro de aire, lo cual puede facilitar la generación de gases tóxicos, como etileno.
- Anegamiento potencial del suelo por reducción de su permeabilidad al variar las propiedades hidrodinámicas del suelo para liberar agua a presiones bajas.
- Decremento de la proporción de poros grandes con relación a los poros pequeños.

2.3.3.1 Métodos para estimar la densidad aparente

Existen principalmente tres métodos para estimar la densidad aparente. El método del terrón que consiste en coleccionar y pesar algunos terrones, posteriormente estimar indirectamente su volumen por medio del volumen del agua desplazada al sumergir el terrón (cubierto con parafina) en agua. Otro método consiste en excavar un pozo, el material extraído se pesa y su volumen se estima al agregar agua en la cavidad previamente cubierta con un material impermeable (plástico). El último es el método del cilindro, que consiste en introducir un cilindro de dimensiones conocidas (volumen conocido) para obtener una muestra de suelo que es secada y pesada posteriormente. Los tres métodos requieren de una estimación del contenido de humedad presente en la muestra para conocer el peso seco de la muestra.

Tabla 2.3 Variabilidad de los parámetros del suelo obtenidos a partir de muestras de suelo (Warrick, 1997)

Parámetro	Rango del CV (%)
Variación pequeña	
Porosidad(ϵ)	7-11
Densidad aparente (ρ_a)	3-26
pH	2-15
Variación media	
porcentaje de arena o arcilla	2-55
contenido de humedad a 0.1 bares (θ)	4-20
contenido de humedad a 15 bares(θ)	14-45
Variación grande	
Conductividad hidráulica a saturación (K_s)	48-320
Velocidad de Infiltración (i)	23-97
Concentración de solutos natural	13-260

La porosidad y la densidad aparente son los parámetros del suelo que presentan menor variabilidad temporal y espacial. La **Tabla 2.3** muestra los valores del coeficiente de variación (CV), la desviación estándar entre la media aritmética, calculada a partir de valores de los parámetros del suelo estimados de muestras de suelo colectadas en campo. Valores del CV mayores al 50% indican una alta variabilidad del parámetro del suelo.

2.3.4 Densidad real o densidad de partículas sólidas (ρ_s)

La densidad de partículas es la relación de la masa de las partículas sólidas (M_s) del suelo entre el volumen que ocupan (V_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.3)$$

Esta expresión no considera el espacio poroso, es como si el suelo se comprimiera lo suficiente liberando el aire que ocupa el espacio poroso para formar un sólido. Los valores de la densidad de los minerales comunes y de partículas orgánicas son reportados con cierto rango de variación por diferentes autores. La densidad de partículas minerales del suelo varía de 2.6 a 2.85 g cm⁻³, mientras que para las partículas orgánicas el valor de la densidad varía de 1.2 a 1.5 g cm⁻³. Muchos de los minerales más abundantes de los suelos, como cuarzo y feldespato, tienen densidades alrededor de 2.65 g cm⁻³ por lo que es común usar este valor como promedio para esta propiedad. Suelos con alto contenido de materia orgánica tienen una densidad de partículas menor de 2.4 g cm⁻³.

Por ejemplo, si se tiene una muestra de suelo seco con peso de 100 g y un volumen de 38 cm³ (sin considerar el espacio poroso), el valor de ρ_s será de 2.63 g cm⁻³.

El valor de ρ_s sirve para tener una idea de los minerales presentes en el suelo, especialmente si se combina el conocimiento de esta propiedad con algunas otras como color, como es, por ejemplo, el caso de los suelos ferralíticos en contraste con los suelos orgánicos. Sirve también para interpretar mejor el valor de la densidad aparente del suelo y para estimar la porosidad (ϵ), el porcentaje de espacio ocupado por poros en un suelo.

El método más usado para determinar la densidad de sólidos (ρ_s) utiliza un picnómetro, que es un pequeño recipiente de vidrio el cual puede ser llenado con un volumen exacto de un líquido. La muestra de suelo es colocada en el picnómetro para después llenarlo con agua. El agua adicionada ocupa el espacio poroso del suelo. Con los pesos: del agua adicionada, del suelo y del picnómetro es posible determinar el volumen del agua desplazado por la muestra del suelo y determinar la densidad de sólidos.

2.3.5 Porosidad del Suelo (ϵ)

La porosidad del suelo es el espacio ocupado por aire y agua, comúnmente expresada como la fracción de poros por unidad de volumen de suelo. Suelos arenosos tienen menor espacio poroso que suelos arcillosos y en consecuencia presentan mayor densidad aparente y menor porosidad.

El contenido volumétrico de sólidos o espacio sólido es el volumen de sólidos contenido por unidad de volumen de suelo. La suma de la porosidad y el espacio ocupado por los sólidos es igual a la unidad, por lo que se puede utilizar la siguiente relación para estimar la porosidad:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (2.4)$$

Donde ε es la porosidad del suelo expresada en fracción, ρ_a es la densidad aparente (g cm^{-3}), ρ_s es la densidad de sólidos (g cm^{-3}), V_v es el volumen de vacíos (cm^3) y V_t es el volumen total del suelo (cm^3).

Un suelo agrícola cuya densidad aparente es de 1.33 g cm^{-3} tiene una porosidad aproximada de $0.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (50%) tomando una densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} , igual distribución de poros y sólidos. Lo anterior significa que la mitad del volumen esta potencialmente disponible para almacenamiento de agua. Los valores de la porosidad del suelo varían del 35% para suelos compactados al 65% en suelos bien agregados, con alto contenido de materia orgánica y coloides.

Existen otros métodos empíricos para estimar la porosidad del suelo a partir de ecuaciones algebraicas empíricas o por interpolación usando isocurvas de porosidad dentro del triángulo de texturas. Éste método empírico es muy aplicado en proyectos de diseño de riego cuando se carecen de datos confiables de campo.

La porosidad del suelo está determinada principalmente por el acomodo que presentan las partículas del suelo; los suelos arcillosos y orgánicos, ricos en coloides generalmente presentan altos valores de porosidad, alrededor de $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ debido a que las cargas eléctricas de estos coloides generan un acomodo de partículas con gran espacio libre (poros); los suelos arenosos presentan bajos valores de porosidad debido a la baja capacidad reactiva de sus partículas, sus valores son de alrededor de $0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. En suelos compactados se reportan valores de porosidad de $0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. La porosidad de los suelos agrícolas varía normalmente de 0.4 a $0.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

El diámetro promedio de los poros en suelos arenosos es mayor que en suelos arcillosos. Los suelos arenosos tienen entre otras características que la velocidad de infiltración de agua es alta y la capacidad de retención de agua es baja. En los suelos arcillosos sucede lo contrario, la velocidad de infiltración es baja y la capacidad de retención es alta.

El tamaño de los poros también tiene importancia en el crecimiento de las raíces. El diámetro promedio de raíces en plantas anuales es de alrededor de 0.03 cm con pelos radicales de 0.0001 cm . En consecuencia, el volumen de suelo ocupado por las raíces es grande.

La porosidad del suelo, al igual que la densidad aparente, depende de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, tipo e intensidad de labranza, cultivo y otras características del suelo.

La porosidad del suelo tiene gran importancia agrícola, sin embargo, como regla general los suelos sometidos a un sistema de labranza agrícola intensiva tienden a compactarse, y al reducirse su porosidad su productividad disminuye.

La fase sólida también tiene propiedades importantes, entre las cuales destacan el tamaño, distribución, forma y acomodo de las partículas individuales del suelo, así como su composición y propiedades físicas, químicas y mineralógicas.

La porosidad es de uso limitado si no se tiene un indicador del tamaño de los poros. Los microporos (< 0.01 mm) son importantes para el almacenamiento de agua, los poros medianos ($0.06 - 0.01$ mm) facilitan la conductividad capilar y los macroporos (> 0.06 mm) facilitan la infiltración y drenaje, y promueven la aeración.

2.3.6 Distribución del tamaño de partículas

Además de la porosidad del suelo es importante conocer los tamaños de poros o partículas presentes en el suelo. Esta propiedad se conoce como distribución del tamaño de partículas o distribución del tamaño de poros. Su determinación es importante en el estado de los procesos de transporte del suelo. Un suelo con poros similares (mismo tamaño) se drena uniformemente a un tiempo dado mientras que si tiene poros de diferentes tamaños el drenaje ocurre lentamente, empezando por los poros grandes y finalizando con los poros pequeños.

Los resultados de un análisis de tamaños de partículas pueden ser representados en curvas acumuladas, tal como se muestra en la **Figura 2.4** que muestra la distribución del tamaño de partículas de cuatro muestras de suelos. Los tamaños son expresados como diámetros equivalentes en lugar de las diferentes formas que pueden tener las partículas del suelo. El suelo arenoso concentra sus partículas en el rango mayor a $100 \mu\text{m}$. Un suelo bien graduado tendría una curva gradualmente ascendente, mientras que un suelo mal graduado tendría cambios en solamente una parte estrecha del rango para los de tamaños de partículas, como lo muestra la curva del suelo arenoso de la figura 2.4.

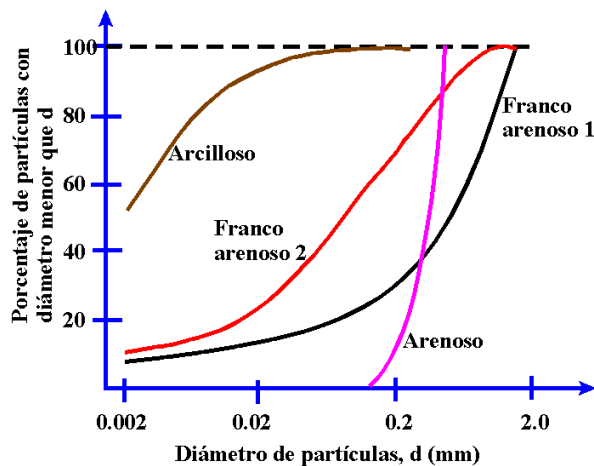


Figura 2.4 Distribución acumulada del tamaño de partículas para cuatro tipos de suelos.

2.3.7 Superficie específica (S_e)

Las partículas pequeñas tienen una influencia significativa en muchos procesos físico-químicos que se presentan en el suelo, primordialmente porque estas partículas tienen una gran superficie de contacto o reactiva con relación a su masa. La superficie por unidad de masa o volumen es llamada la superficie específica (S_e).

$$S_e = \frac{A_s}{M_s} \quad (2.5)$$

Donde A_s es la superficie total (L^2) de las partículas en la muestra del suelo y M_s es la masa de la muestra de suelo (M).

Para calcular la superficie específica de una partícula se requiere conocer las siguientes características:

- Área de la superficie de la partícula.
- Volumen de la partícula.
- Masa de la partícula.

El área de una partícula esférica esta dada por:

$$A_{sp} = 4\pi r^2 \quad (2.6)$$

El volumen de una partícula esta dado por:

$$V_{sp} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2.7)$$

Por lo que la masa de la partícula puede ser estimada como:

$$M_{sp} = \rho_s V_{sp} = \frac{4}{3}\rho_s \pi r^3 \quad (2.8)$$

El valor de la superficie específica de una partícula esférica es:

$$S_{ep} = \frac{A_{sp}}{M_{sp}} = \frac{3}{\rho_s r} \quad (2.9)$$

La superficie específica de las partículas del suelo está en función inversa con su radio. A menor radio de partícula, mayor superficie específica (S_e). La **Tabla 2.4**

muestra la variación en S_e al cambiar el diámetro de partículas esféricas empaquetadas en un volumen de 1 m^3 . Es importante notar el gran incremento en la superficie total de las partículas a medida que el radio de partícula disminuye.

Tabla 2.4 Variación de la superficie específica (S_e) de partículas esféricas en relación con su radio, con M_s y V_s constantes, empaquetadas en un volumen de 1 m^3

Radio (m)	Valores para una partícula			Esferas en un cubo de 1 m^3					
	$A_{sp}(\text{m}^2)$	$V_{sp}(\text{m}^3)$	$M_{sp}(\text{kg})$	Total partículas esféricas	$A_s(\text{m}^2)$	$V_s(\text{m}^3)$	$M_s(\text{kg})$	Vol. Vacíos (m^3)	$S_e(\text{m}^2/\text{kg})$
0.5	3.14E+00	5.24E-01	1.39E+03	1	3.1	0.524	1387.5	0.476	2.26E-03
0.25	7.85E-01	6.54E-02	1.73E+02	8	6.3	0.524	1387.5	0.476	4.53E-03
0.125	1.96E-01	8.18E-03	2.17E+01	64	12.6	0.524	1387.5	0.476	9.06E-03
0.0625	4.91E-02	1.02E-03	2.71E+00	512	25.1	0.524	1387.5	0.476	1.81E-02
0.015625	3.07E-03	1.60E-05	4.23E-02	32768	100.5	0.524	1387.5	0.476	7.25E-02
0.0019531	4.79E-05	3.12E-08	8.27E-05	16777216	804.2	0.524	1387.5	0.476	5.80E-01
0.0009766	1.20E-05	3.90E-09	1.03E-05	134217728	1608.5	0.524	1387.5	0.476	1.16E+00
0.0001221	1.87E-07	7.62E-12	2.02E-08	68719476736	12868.0	0.524	1387.5	0.476	9.27E+00
6.104E-05	4.68E-08	9.52E-13	2.52E-09	5.49756E+11	25735.9	0.524	1387.5	0.476	1.85E+01
7.629E-06	7.31E-10	1.86E-15	4.93E-12	2.81475E+14	205887.4	0.524	1387.5	0.476	1.48E+02


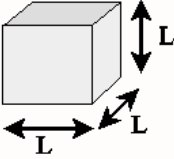
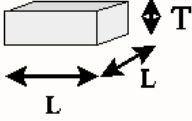
	Esfera	cubo	plato
			
AREA	$4\pi r^2$	$6L^2$	$2L^2 + 4L(T)$ $= 2L^2$ si $(L \gg T)$
VOLUMEN	$\frac{4\pi r^3}{3}$	L^3	$L^2 (T)$
S_e	$3/(r \rho_s)$	$6/(L \rho_s)$	$2/(T \rho_s)$

Figura 2.5 Superficie específica para varias formas de partículas sólidas

La **Figura 2.5** presenta el área, volumen y superficie específica para tres formas de partículas sólidas. Se observa que para una forma plana, donde el espesor es muy pequeño, la superficie específica depende en forma inversa del espesor de la partícula, a menor espesor mayor es la superficie específica.

La superficie de una muestra de suelo (A_s) puede ser determinada saturando la muestra con un solvente polar (comúnmente glicerol o glicol), posteriormente se remueve el exceso del solvente en un disecador sellado al vacío, la muestra es pesada continuamente hasta alcanzar un estado de equilibrio donde se asume que se ha formado una capa unimolecular del solvente en la superficie de las partículas del suelo. De esta manera, conociendo la masa del solvente presente en la muestra es posible estimar la superficie de la muestra del suelo. Por ejemplo, para el solvente Etileno Glicol Monoetil Eter (EGME) se ha determinado experimentalmente que 0.000286 gr de EGME forman una superficie unimolecular de 1 m². Si se usa 0.0098 gr de EGME para saturar una muestra de suelo de 0.7962 gr, entonces la muestra tiene una superficie de $A_s = 34.26$ m² y una superficie específica de 43.03 m² gr⁻¹ de suelo.

Mientras mayor sea la superficie específica de un suelo, mayor es su capacidad de retención y su resistencia al flujo del agua. Un suelo arcilloso presenta mayor superficie de resistencia al paso del agua que un suelo arenoso, al tener el primero una mayor superficie específica que el segundo.

2.3.8 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de un suelo es una medida de las cargas negativas que éste contiene. La CIC es también una medida de la capacidad del suelo para retener nutrientes en forma catiónica. Las partículas de arena y limo tienen baja

CIC por lo que su capacidad para retener cationes es baja. De hecho lo anterior es la razón del por qué es recomendable aplicar dosis frecuentes, pero bajas, de fertilizantes nitrogenados en suelos ligeros.

Los suelos se forman durante un proceso de intemperización de rocas que produce las partículas que los forman. El diámetro de las partículas depende del grado de intemperización al que éstas hayan sido sometidas. Las partículas de diámetro más pequeño (las arcillas), se comportan como coloides al igual que la materia orgánica procedente de otro proceso formativo, la descomposición de residuos animales y vegetales.

La reactividad de un suelo está asociada con la cantidad y el tipo de coloides ya que, por su carga negativa, desarrollada durante los procesos formativos del suelo, puede atraer partículas cargadas positivamente (cationes). Los cationes retenidos en la superficie de las partículas del suelo pueden ser intercambiables por otros cationes en solución. Los cationes adsorbidos al suelo forman parte de la reserva de varios nutrientes catiónicos que continuamente están resuministrando a la solución del suelo los nutrientes requeridos por las plantas. La cantidad de cationes intercambiables que un suelo puede tener es llamada la capacidad de intercambio catiónico y se expresa en centimoles de carga (+) por kilogramo de suelo. A mayor valor de CIC, mayor es la cantidad de cationes que un suelo puede retener.

La CIC es expresada en mmol por kg de suelo, aunque anteriormente las unidades comunes eran los miliequivalentes (meq) por gramo de suelo. El rango de valores de CIC pueden variar de 10 mmol kg⁻¹ en suelos ligeros hasta 600 mmol kg⁻¹ en suelos pesados con alto porcentaje de materia orgánica.

2.3.9 Estructura

La estructura de un suelo se refiere a la forma en que las partículas del suelo están arregladas para formar agregados o partículas secundarias. Las partículas de arcilla, por ejemplo, forman agregados que son difíciles de romper. La arcilla y la materia orgánica constituyen el material cementante para la formación de agregados. Existen varias formas naturales de agregación de los suelos: migajosa, granular, laminar, poliédrica, prismática, y columnar.

La densidad aparente disminuye a medida que la agregación y el contenido de arcilla aumentan. Las operaciones de labranza no afectan la textura, pero alteran la estructura del suelo. Las operaciones de labranza primaria (barbecho) de un terreno disminuyen la densidad aparente de un suelo (incrementan el espacio poroso), en cambio, las operaciones de labranza secundaria (cultivo y rastreo) incrementan la densidad aparente (diminuyen el espacio poroso). Suelos cultivados presentan mayor densidad aparente que suelos no cultivados. El paso de maquinaria sobre el suelo incrementa la densidad aparente al compactar el suelo.

La estructura de un suelo puede considerarse en relación con la forma, estabilidad y consistencia de los agregados. La forma estructural se refiere al tamaño y forma de los agregados, y a la red de poros presentes. La estructura cambia con la profundidad, la **Figura 2.6** muestra la variación estructural de un suelo agrícola franco arcilloso que tiene un efecto especial sobre las propiedades del suelo. Una buena estructura incrementa la porosidad del suelo, aumenta la aireación, drena excesos de agua y permite la penetración de raíces.

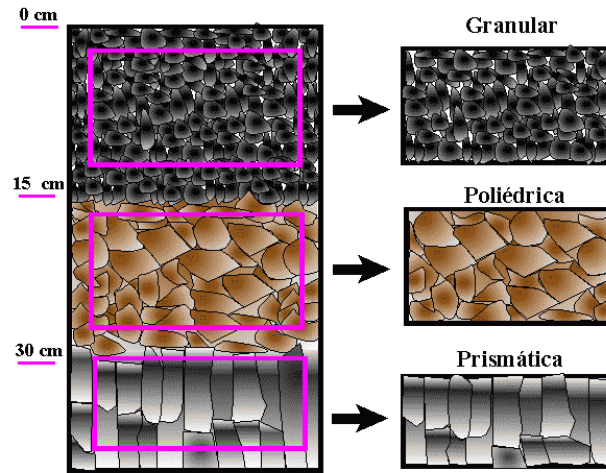


Figura 2.6 Variación típica de la estructura de un suelo agrícola.

2.3.10 Perfil del suelo

El perfil del suelo es básicamente una sección vertical del suelo en el cual pueden distinguirse capas u horizontes. La naturaleza de estos horizontes depende del material parental, vegetación nativa, condiciones de drenaje y factores climáticos, como temperatura y precipitación. La interacción de estos factores produce una variación en profundidad, textura, color y otras propiedades físico-químicas del suelo.

Comúnmente, un perfil de suelo agrícola tiene un número definido de horizontes. El horizonte A por su posición se encuentra bajo los efectos cambiantes del clima, vegetación y actividades biológicas. Éste se forma cerca de la superficie, donde el movimiento de sólidos o material soluble es alto, o donde se presenta la acumulación de material orgánico, por ejemplo, en suelos forestales o pastizales. No todos los suelos tienen horizonte A.

El horizonte B se caracteriza por una acumulación de productos como arcilla y materia orgánica que han sido lixiviados del horizonte A. Difiere del horizonte A en color, textura y estructura. Los horizontes A y B conforman la zona radical de la mayoría de los cultivos anuales.

El horizonte C es el más profundo y prácticamente no es afectado por la actividad biológica y climática. La **Figura 2.7** muestra la disposición de los horizontes en un suelo agrícola.

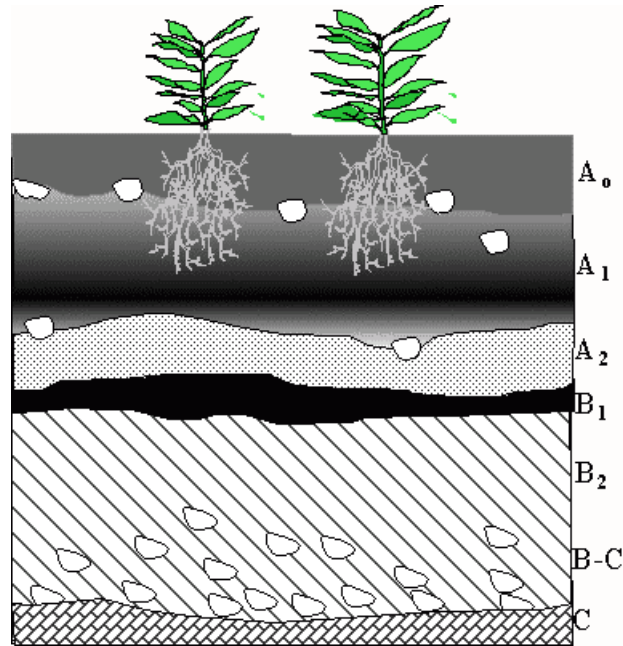


Figura 2.7 Disposición de los estratos en un perfil de un suelo agrícola.

2.4 EJEMPLOS

Ejemplo 2.4.1 ¿Cuánto tiempo se requiere para coleccionar solamente la fracción menor a $0.002 \mu\text{m}$ a una profundidad de 1 cm usando el método de la pipeta para determinar las clases texturales de la muestra de suelo?

Se tiene que:
$$v = \frac{h}{t} \therefore t = \frac{h}{v}$$

Pero de la ecuación 2.1:

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2 g}{18\mu}$$

Entonces:

$$t = \frac{18h\mu}{d^2 g(\rho_s - \rho_f)} = \frac{(18)(1 \text{ cm})(0.008 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1})}{(2 \times 10^{-7} \text{ cm})^2 (981 \text{ cm s}^{-2})(2.65 - 1) \text{ g cm}^{-3}}$$

$$t = \frac{0.144}{6.4746 \times 10^{-11}} = 222.9 \times 10^7 \text{ s} \approx 70 \text{ años}$$

Ejemplo 2.4.2 Calcular la densidad de sólidos, si se tiene que la masa de una muestra de suelo seco agregada a un picnómetro es de $M_s = 5.16 \text{ g}$, la masa del picnómetro con el suelo y el agua es de $M_{psw} = 66.51 \text{ g}$, la masa del picnómetro es de $M_{pw} = 63.17 \text{ g}$:

De la ecuación 2.3:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{\left(\frac{M_s - (M_{psw} - M_{pw})}{\rho_w} \right)} = \frac{5.16 \text{ g}}{\left(\frac{5.16 - (66.51 - 63.17)}{1} \right) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 2.83 \text{ g cm}^{-3}$$

Ejemplo 2.4.3 Estimar las superficies específicas para limo y arena si se considera una arena esférica con diámetro de 0.05 mm y un limo esférico de 0.002 mm de diámetro, con una densidad de partícula de 2.7 g cm^{-3} .

De la figura 2.5, Para la arena:

$$S_{sp} = \frac{A_{sp}}{M_{sp}} = \frac{4 \pi r^2}{\rho_p \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)} = \frac{3}{\rho_p r} = \frac{3}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(2.5 \times 10^{-3} \text{ cm})} = 444.44 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Para el limo:

$$S_{sp} = \frac{3}{\rho_p r} = \frac{3}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(1.0 \times 10^{-4} \text{ cm})} = 11111.11 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Estos resultados indican que la superficie específica del limo es 25 veces mayor que la correspondiente para la arena.

Ejemplo 2.4.4 Estimar la superficie específica de una partícula en forma de disco con un diámetro de 0.002 mm, un espesor de 10^{-6} mm , y $\rho_p = 2.7 \text{ g cm}^{-3}$.

De la figura 2.5

$$S_s = \frac{A_s}{M_s} = \frac{2\pi r^2 + 2\pi rT}{\rho_p \pi r^2 T} = \frac{2(r+T)}{\rho_p r T} \approx \frac{2}{\rho_p T} = \frac{2}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(10^{-7} \text{ cm})} = 7.4 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$S_s = 7.4 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

En la ecuación anterior se asumió que $r > T$ en consecuencia $r+T \approx r$; el radio es mucho mayor que el espesor. Los resultados indican que la superficie específica de la arcilla es 170,000 veces mayor que la correspondiente a la arena. Un caso extremo puede ser dado por la materia orgánica, que puede tener valores de $10^7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Altos valores de S_e tienen gran impacto en las propiedades reactivas de los suelos.

Ejemplo 2.4.5. Estimar la densidad aparente (ρ_a) de acuerdo a los siguientes datos obtenidos por el método del cilindro:

Peso del suelo seco = 96.19 g.

Dimensiones del cilindro = 5.4 cm altura x 3 cm diámetro.

$$V_t = A h = \left[\pi \frac{D^2}{4} \right] h = 3.1415 \frac{3^2}{4} 5.4 = 38.170 \text{ cm}^3$$

De la ecuación 2.2

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} = \frac{96.19 \text{ g}}{38.170 \text{ cm}^3} = 2.52 \text{ g cm}^{-3}$$

Ejemplo 2.4.6. Estimar la porosidad total (ε) de una muestra de suelo con una densidad aparente de 1.35 g cm^{-3} y tres valores de la densidad de partículas 2.4, 2.6 y 2.85 g cm^{-3} .

Con el uso de la ecuación 2.4

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

Resulta:

ρ_a (g cm^{-3})	2.4	2.6	2.85
ε	0.438	0.481	0.526

A mayor densidad aparente, mayor es la porosidad.

“El agua habla sin cesar y nunca se repite “
Octavio Paz

**El agua en
el suelo**



3

CAPITULO 3

EL AGUA EN EL SUELO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauro Iñíguez Covarrubias

3.1 INTRODUCCIÓN

El agua disponible para las raíces depende de varias condiciones: que el agua se encuentre almacenada en el suelo, que el suelo pueda transmitirla de las zonas de disponibilidad a las zonas de consumo, y que el agua se encuentre retenida con un nivel energético mínimo para que las raíces la absorban con el mínimo esfuerzo.

Para entender el movimiento del agua en el suelo, es necesario conocer las variables del estado del agua en el suelo y su movimiento dentro, y fuera de la zona de raíces. El ciclo del agua a escala parcelaria consiste en una serie de eventos secuenciales o dinámicos concurrentes; inicia con la entrada del agua a través de la superficie del suelo (infiltración) durante el riego o lluvia, continúa con la redistribución, drenaje, absorción del agua por las plantas y culmina con los procesos de evaporación y transpiración vegetal.

El agua es un compuesto covalente cargado eléctricamente de manera no uniforme. Aunque una molécula de agua es eléctricamente neutra, porque tiene el mismo número de protones y electrones, forma un dipolo, esto es, el centro de la carga positiva no está en el mismo punto espacial que el centro de las cargas negativas. El resultado es la presencia de un campo eléctrico en la vecindad de cada molécula, la parte del oxígeno de la molécula de agua tiene densidad de carga negativa mientras que la parte del hidrógeno tiene densidad de carga positiva. Como las moléculas del agua son polares, pueden interactuar tanto entre ellas, como con otros iones en solución, con el campo eléctrico de los minerales o con la materia orgánica del suelo.

Las propiedades eléctricas del agua están íntimamente relacionadas con las propiedades de los elementos que contiene en solución. Debido a que los átomos de hidrógeno y oxígeno en las moléculas del agua tienen una carga eléctrica desbalanceada, las moléculas están unidas por enlaces llamados puentes de hidrógeno que inmovilizan a las moléculas, sin que puedan ser separadas como iones. Por esta razón el agua pura no puede conducir corriente eléctrica. De hecho el agua pura es un buen aislante y tiene una constante dieléctrica alta que indica que tiene una gran capacidad de neutralizar la atracción entre iones de diferente carga, como es el caso de los iones presentes en los fertilizantes solubles en agua, 1 litro de agua puede disolver hasta 8.4 kg de nitrato de amonio (NH_4NO_3) que se disocia en cationes amonio (NH_4^+) y aniones nitrato (NO_3^-).

- El agua almacenada en el espacio poroso del suelo conocida como la solución del suelo desempeña un gran número de funciones en beneficio de las plantas entre las que destacan: Efecto directo sobre su crecimiento y producción de cosecha,
- La solución del suelo es el medio de donde las plantas absorben los nutrientes y es una fuente de reserva de algunos de ellos como el cloro y los sulfatos,
- La humedad aumenta la plasticidad del suelo y reduce su resistencia a la penetración de raíces,
- La humedad del suelo facilita la descomposición de los residuos orgánicos con su consiguiente liberación de nutrientes,
- La solución del suelo es un agente amortiguador de los cambios de temperatura por lo que ayuda a tener un medio ambiente más estable para el desarrollo de las plantas,

Cada tipo de suelo tiene características únicas que determinan cuanta agua se retiene y cuanta se dispone para las plantas. Con esta información es posible determinar el volumen y la frecuencia del riego. A continuación se presentan los principios básicos relacionados con el agua en el suelo.

3.2 HUMEDAD DEL SUELO (θ)

El suelo es un material poroso, como una esponja capaz de retener agua. La máxima cantidad de agua que un suelo puede retener y drenar es “casi” constante. Cada suelo tiene constantes de humedad específicas, de vital importancia en la calendarización del riego. Una descripción esquemática de las diferentes constantes de humedad del suelo se presenta en la **Figura 3.1**.

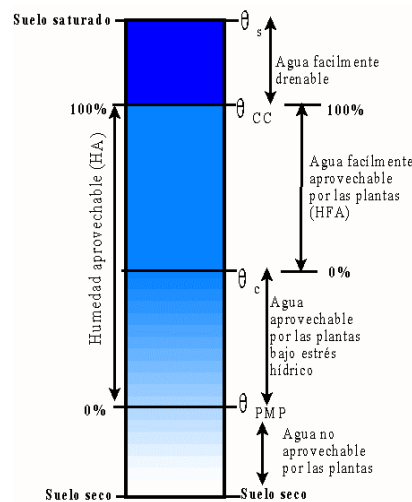


Figura 3.1 Constantes de humedad (θ) del suelo.

La estimación del contenido de humedad de un suelo permite calcular la lámina de riego o la profundidad de mojado, así como definir el grado de estrés por déficit

hídrico de los cultivos. Valores consecutivos del contenido de humedad permiten cuantificar otros procesos como la evapotranspiración, la precipitación efectiva, la lámina infiltrada o percolada.

Para expresar el contenido de humedad del suelo se utilizan varias expresiones. A la cantidad de agua por unidad de masa o volumen de suelo se le conoce como contenido de humedad gravimétrico o volumétrico, respectivamente.

3.2.1 Contenido de humedad gravimétrico (θ_m)

El contenido de humedad (θ) es una propiedad que define la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo, generalmente la humedad se estima a partir de un cociente gravimétrico expresado en por ciento, de la masa de agua presente en una muestra de suelo (M_{ag}) y la masa de la muestra del suelo después de haber sido secada y haber alcanzado un valor constante (M_{ss}).

$$\theta_m = \frac{\text{masa del agua en la muestra}}{\text{masa de la muestra seca}} 100 = \frac{M_{ag}}{M_{ss}} 100 \quad (3.1)$$

3.2.2 Contenido de humedad volumétrico (θ_v)

El contenido de humedad puede expresarse como un cociente volumétrico (expresado en por ciento) del volumen de humedad en una muestra de suelo y el volumen del suelo seco:

$$\theta_v = \frac{\text{volumen del agua en la muestra}}{\text{volumen total de la muestra}} 100 = \frac{V_{ag}}{V_t} 100 \quad (3.2)$$

La densidad aparente (ρ_a), definida en el capítulo anterior, permite relacionar el contenido de humedad gravimétrico (θ_m) con el volumétrico (θ_v) mediante la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{\rho_a}{\rho_{ag}} \theta_m \quad (3.3)$$

Donde ρ_{ag} es la densidad del agua. La **Tabla 3.1** Presenta los valores de la densidad de agua a diferentes temperaturas. Para fines prácticos se puede asumir una densidad del agua de 1 g cm^{-3} .

Tabla 3.1 Densidad del agua en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Densidad g cm ⁻³	Densidad relativa (%)
0 (líquido)	0.9998	99.98
0 (sólido)	0.9170	91.70
4	1.0000	100.00
10	0.9997	99.97
15	0.9991	99.91
20	0.9982	99.82
30	0.9956	99.56

Como el rango de valores de la densidad aparente para la mayoría de los suelos agrícolas se encuentra entre 1 y 2 g cm⁻³, el contenido de humedad volumétrico es mayor que el gravimétrico. Si se asume la densidad del agua = 1 g cm⁻³ entonces:

$$\theta_v = \rho_a \theta_m = \frac{M_{ag}}{V_t} \quad (3.4)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente relativa y es adimensional.

Cuando no se especifican las unidades (masa o volumen), se asume que el contenido de humedad está expresado en unidades volumétricas.

Es conveniente clasificar las diferentes regiones humedad del suelo en función de su disponibilidad para las plantas: región gravitacional, capilar e higroscópica. Para acotarlas se han definido varias constantes de humedad: contenido de humedad a saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente.

El contenido de humedad de un suelo bajo condiciones agrícolas debe estar entre capacidad de campo y un valor conocido como humedad crítica (θ_c) que define el umbral a partir del cual se afecta el rendimiento del cultivo. A continuación se describen los parámetros de humedades del suelo.

3.2.3 Contenido de humedad a saturación(θ_s)

El contenido de humedad a saturación (θ_s) es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener, el cual se presenta cuando el espacio poroso total del suelo se encuentra ocupado por agua. El agua que se drena por la acción de la gravedad en un suelo saturado se le llama agua libre o gravitacional. Un suelo saturado es dañino para las plantas no acuáticas puesto que en estas condiciones se ve impedida la respiración de las raíces.

3.2.4 Capacidad de campo (θ_{cc})

Cuando un suelo se satura y se deja que el agua drene libremente hasta alcanzar su capacidad máxima de retención se dice que el suelo se encuentra a capacidad de campo (θ_{cc}). Cualquier cantidad de agua adicional a la capacidad de campo es fácilmente drenable por efecto de la fuerza gravitacional.

El concepto de capacidad de campo (CC) fue introducido por Veihmeyer y Hendrickson en 1931, quienes lo definieron como la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de la gravedad y en ausencia de evaporación, es decir, es el contenido de humedad que permanece en el suelo después de una lluvia o riego pesado, cuando prácticamente el movimiento descendente del agua cesa. La definición implica un libre movimiento del agua en el suelo bajo la acción única de la gravedad.

La definición de capacidad de campo es un término controversial, ya que su definición puede carecer de sentido físico para algunos suelos que continúan drenando por tiempos largos sobretodo en suelos arcillosos. Dicho término es de valor limitado cuando el riego es muy frecuente, como en el caso del riego por goteo donde el riego puede ser aplicado diariamente. Aunque el término tiene varias limitaciones, es muy utilizado en el riego por gravedad y aspersión debido a su valor práctico. Por muchos años una gran cantidad de recursos se aplicó en estimar indirectamente la capacidad de campo en el laboratorio, sin embargo su aplicabilidad ha sido limitada ya que su determinación depende de varias propiedades estáticas y dinámicas del suelo y sus interrelaciones que dependen de la composición global del perfil del suelo. La estimación de θ_{cc} a partir de una o más muestras alteradas de suelo expresa, en la mayor parte de los casos, una información parcial de este parámetro cuya magnitud es susceptible de ser sobre o subestimada. Originalmente θ_{cc} ha sido expresado gravimétricamente, sin embargo es más conveniente expresarlo volumétricamente sobre todo cuando se calculan láminas de riego.

3.2.5 Punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP})

El punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}) se define como el valor mínimo permisible de humedad que el suelo puede alcanzar, sin tener un efecto de detrimento vital irreversible para la planta, pudiendo ser estimado en laboratorio por medio de plantas indicadoras mantenidas en macetas bajo condiciones similares al cultivo de interés. El contenido de humedad se verifica de manera frecuente hasta que las plantas se marchitan “permanentemente”. Esto es, las plantas no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera saturada por 12 hrs. El concepto de punto de marchitamiento permanente (PMP) fue propuesto en 1911 por Briggs y Shantz.

Existe una regla empírica, que a falta de un valor experimental puede ser útil para estimar θ_{PMP} dividiendo el valor de θ_{cc} entre 1.8. Una mejor estimación se logra al dividir θ_{cc} entre 1.7 para el caso de las arcillas y entre 2 para el caso de las arenas (Hargreaves y Samani, 1992).

3.2.6 Humedad aprovechable (HA)

La diferencia entre θ_{CC} y θ_{PMP} se le conoce como Humedad Aprovechable (HA). La humedad aprovechable es generalmente expresada en porcentaje volumétrico.

$$HA = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (3.5)$$

La **Figura 3.2** describe la variación general de la humedad aprovechable (HA) en función de la textura del suelo.

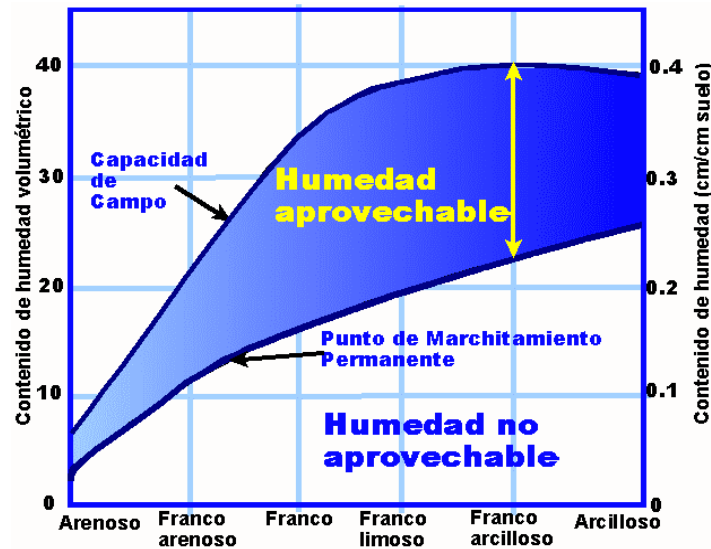


Figura 3.2 Constantes de humedad para varias texturas de suelo.

La humedad disponible actual del suelo esta dada por la siguiente ecuación:

$$HD = \theta_{CC} - \theta_a$$

Donde θ_a es la humedad actual del suelo.

3.2.7 Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA)

La Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA) es la fracción de la HA que puede ser absorbida por las plantas sin causar problemas de estrés hídrico.

Los rendimientos se reducen cuando el contenido de humedad se acerca al punto de marchitamiento permanente, tal como se representa en la **Figura 1.2**, dicha reducción es más drástica durante las etapas fenológicas críticas. De esta manera en lugar de considerar la humedad aprovechable (HA) como el rango utilizable por las

plantas, se utiliza solamente una fracción, a esta fracción se le conoce como fracción o factor de abatimiento o déficit máximo de humedad permisible (f).

Tradicionalmente se ha tomado un valor de “ f ” igual a 0.5. Sin embargo el valor depende tanto del cultivo como del suelo, el manejo del riego y las condiciones ambientales. Al inicio del ciclo un cultivo puede estresarse, por lo cual, el valor f es grande, pero a medida que alcanza sus periodos críticos como la floración o formación de frutos, el valor f alcanza su valor mínimo.

Para cultivos sensibles al estrés hídrico como las hortalizas, con raíces poco profundas en ambientes cálido-secos, el valor de f puede ser tan bajo como 0.2, mientras que para cultivos resistentes a la sequía, con raíces profundas en ambientes húmedos el valor de f puede ser de hasta 0.8.

Ejemplo. Si $\theta_{CC} = 32\%$, $\theta_{PMP} = 15\%$, y $f = 0.5$, entonces $HFA = 8.5\%$ y la humedad aprovechable (HA) es de 17% , lo cual indica que un metro de suelo a capacidad de campo tendrá aproximadamente una lámina de 17 cm de agua aprovechable para los cultivos de los cuales solamente 8.5 cm son fácilmente aprovechables, 17 cm de lámina equivale a 1700 m^3 por hectárea. El riego debe aplicarse cuando el contenido de humedad alcanza su valor crítico de $\theta_c = 23.5\%$, que es equivalente a una lámina almacenada de 23.5 cm por metro de suelo.

Si $HA = 17\%$ y $f = 0.4$ entonces la humedad fácilmente aprovechable es de 6.8% , lo cual indica que las plantas sólo disponen de 6.8 cm por cada 100 cm de suelo a capacidad de campo.

Tabla 3.2 Sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico (FAO, 1990).

Sensibilidad	Baja	Baja-Media	Media-Alta	Alta
Cultivos	Algodón	Alfalfa	Tomate	Arroz
	Mandioca	Cacahuete	Cebolla	Plátano
	Mijo	Cítrico	Sandía	Caña de azúcar
	Sorgo	Girasol	Maíz	Hortalizas verdes
		Remolacha azucarera	Repollo Chile morrón	Papa
		Soya		
		Trigo		
		Vid		

Las **Tablas 3.2 y 3.3** muestran la sensibilidad de los cultivos a la sequía y los periodos críticos donde el valor de f debe ser mínimo. La **Tabla 3.4** muestra la variación de f a lo largo de las etapas fenológicas de algunos cultivos.

Tabla 3.3 Periodos críticos al déficit hídrico de los cultivos.

Cultivo	Etapa más sensible y observaciones
Alfalfa (forraje)	Inmediatamente después del corte Estrés restringe el crecimiento de hojas y elongación de tallos
Alfalfa (semilla)	Floración
Algodón	Floración y formación de capullo
Piña	Vegetación
Arroz	Panojamiento y floración
Plátano	Todo el periodo
Cacahuete	Floración y formación de frutos
Caña de azúcar	Vegetación (rebrote y elongación tallos)
Cebolla	Agrandamiento de bulbo
Cebolla (Semilla)	Floración
Cítrico	Floración y formación de fruto más que crecimiento del fruto
Girasol	Floración más que formación de frutos Resistente al estrés en primeras etapas
Maíz	Alta sensibilidad durante polinización, floración y formación de grano El estrés hídrico afecta la expansión de la hoja
Olivo	Inmediatamente después de la floración y llenado de frutos
Papa	Formación de estolones y comienzo de tubérculos Muy sensible al estrés hídrico
Chile morrón	Todo el ciclo
Remolacha azucarera	Primer mes después de emergencia Resistente al estrés
Repollo	Crecimiento de cabeza y maduración
Sandía	Floración y llenado de fruto
Soya y sorgo	Floración y formación del grano
Tabaco	Período de rápido crecimiento
Tomate	Transplante, Floración y crecimiento de fruto
Trigo	Floración y formación de grano Relativamente tolerante al estrés
Vid	Vegetación y floración más que llenado de fruto

El valor de la fracción de abatimiento (f) para riegos con alta frecuencia (riego por goteo) varía generalmente entre 0.2 y 0.6, para riegos con baja frecuencia (riego por gravedad) varía entre 0.4 y 0.8 a medida que la profundidad de raíces se incrementa, el valor de f se incrementa, el caso excepcional se presenta en cultivos con poca profundidad radical como el cultivo de la papa donde el valor de f puede ser de 0.4, principalmente durante la época de formación del tubérculo.

Tabla 3.4 Variación estacional del factor abatimiento hídrico (f) de algunos cultivos (SCS-USDA ,1991).

Cultivo	Fase fenológica	Factor de abatimiento (f)
Cebolla	Siembra – formación bulbo	0.8
	Formación bulbo-tamaño medio	0.5
	Tamaño medio- máximo desarrollo	0.4
	Max. Desarrollo-maduración	0.7
Frijol	Siembra – inicio floración	0.7
	Floración- inicio envaine	0.4
	Envaine-maduración	0.5
	Maduración-cosecha	0.8
Granos	Siembra-embote	0.7
	Embote-espigamiento	0.5
	Espigamiento-grano lechoso	0.5
	Grano lechoso-maduración	0.6
Maíz	Siembra-encañe	0.8
	Encañe-espigue	0.5
	Espigue-grano lechoso	0.4
	Grano lechoso-maduración	0.5
	Maduración-cosecha	0.8
Papa	Siembra-formación estolones	0.8
	Estolones-formación tubérculo	0.5
	Tubérculo-2/3 máximo	0.4
	2/3 máximo-maduración	0.7

El valor crítico de humedad (θ_c) está en función de “f” y se define como el contenido de humedad mínimo permisible que no causa estrés a la planta, lo cual se traduce en una reducción apreciable en la evapotranspiración y su consecuente disminución del rendimiento.

3.2.8 Humedad crítica (θ_c)

En la práctica, los cultivos presentan un valor mínimo permitido o valor crítico de la humedad del suelo (θ_c), hasta donde la humedad puede agotarse sin causarles un detrimento en su productividad potencial, este valor no necesariamente es el punto de marchitamiento sino un valor intermedio entre θ_{CC} y θ_{PMP} . El valor crítico de humedad puede estimarse como:

$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \theta_{CC} - f(HA) \quad (3.6)$$

Donde f es el déficit máximo de humedad permisible o factor máximo de abatimiento hídrico o simplemente fracción de abatimiento.

La **Figura 3.3** ilustra los conceptos discutidos en esta sección. El suelo es modelado por medio de un barril con tres compartimentos, representando tres volúmenes de almacenamiento del agua en el suelo: el primero, situado en la parte inferior del dibujo, representa el agua que se encuentra fuertemente retenida en el suelo y no disponible para las plantas. El segundo es el agua aprovechable (HA) que está disponible para las plantas a través de un medio de acceso (raíces) entre el agua del suelo y la planta. El tercero es el agua gravitacional o libre que se mueve fuera de la zona de raíces para constituir lo que se conoce como percolación profunda. El agua libre constituye la diferencia entre los contenidos de humedad a saturación y a capacidad de campo ($\theta_s - \theta_{cc}$).

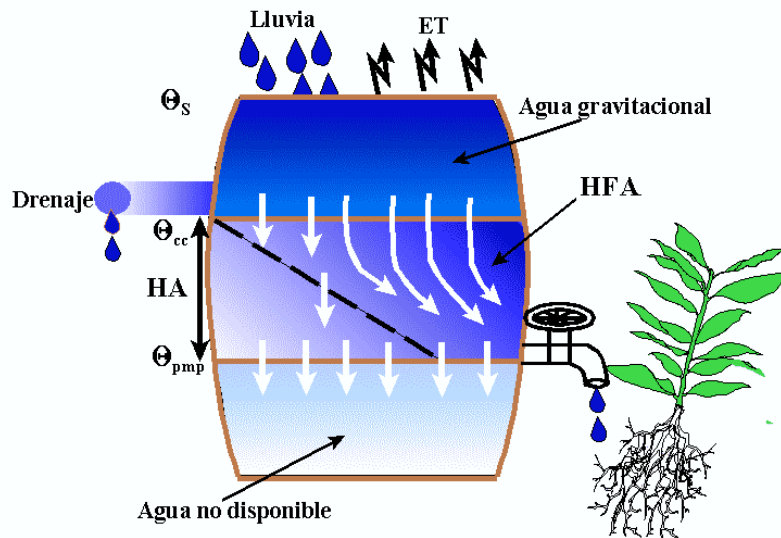


Figura 3.3 Modelo de barril para representar las constantes de humedad.

La **Tabla 3.5** muestra las constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas. Se observa una equivalencia en expresar el contenido de humedad volumétrica en porcentaje en centímetros por metro de suelo. La **Tabla 3.6** muestra el rango de valores para las constantes de humedad de algunos suelos en unidades gravimétricas. Estas tablas no pretenden substituir las estimaciones directas de las propiedades, solamente sirven como referencia cuando se carecen de datos más exactos.

Tabla 3.5 Constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas (porcentajes volumétricos).

Textura	Humedad Aprovechable (% o cm agua / m suelo)	Humedad Fácilmente Aprovechable (% o cm/m)	Capacidad de Campo (% o cm/m)
Arena gruesa	2-6	1-3	6-12
Arena fina	6-8	3-4	10-18
Arena franca	9-10	4-5	15-25
Franco arenosa	10-12	5-6	15-30
Franco limosa	17-21	9-11	25-35
Franco Arcillo-limosa	15-17	8-9	30-40
Arcillo-limoso	13-14	6-7	30-40
Arcilla	11-13	6-7	30-45

Tabla 3.6 Parámetros del suelo obtenidos de muestras superficiales de suelos agrícolas (Marshall y Holmes, 1988).

Textura	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Saturación θ_s (%)	Capacidad De campo θ_{cc} (%)	Punto de Marchitamiento Permanente θ_{PMP} (%)	Humedad Aprovechable HA (%)
Arenosa	1.65 (1.55-1.80)	38 (32-42)	9 (6-12)	4 (4-6)	5 (4-6)
Franco arenosa	1.5 (1.4-1.6)	43 (40-47)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)
Franca	1.4 (1.35-1.5)	47 (43-49)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)
Franco arcillosa	1.35 (1.3-1.4)	49 (47-51)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)
Franco limosa	1.3 (1.25-1.35)	51 (49-53)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)
Arcillosa	1.25 (1.2-1.3)	53 (51-55)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)

NOTA: Los contenidos de humedad están expresados en unidades gravimétricas. El rango de valores se expresa entre paréntesis.

3.2.9 Métodos para estimar la humedad del suelo

Los métodos para medir el contenido de humedad pueden ser divididos en dos categorías: Métodos directos e indirectos.

Los métodos directos se basan en la extracción y cuantificación del agua del suelo mediante un proceso de secado en una estufa, por destilación o absorción en un desecante, o bien a través de la extracción de agua por medio de un material extractante que es afectado por el contenido de humedad.

Los métodos indirectos se basan en la determinación de cierta propiedad físico-química la cual varía en forma definida con el contenido de humedad. Estos métodos usualmente involucran la determinación del estado energético del agua presente en los poros del suelo, las propiedades termales o eléctricas del suelo, la atenuación de rayos gama o la termalización de neutrones.

A continuación se presenta con detalles los principales métodos para estimar la humedad del suelo.

Método gravimétrico

La determinación gravimétrica del contenido de humedad del suelo es el método directo más usado y consiste en tomar una muestra del suelo cuya humedad se desea conocer, almacenarla en un recipiente que no permita alteraciones en su contenido de humedad, para después extraer el agua presente en la muestra por medio de una estufa eléctrica durante un tiempo estándar (24 hr) a una temperatura estándar (105°C), y por último repesar la muestra seca para determinar el agua extraída.

El procedimiento para obtener el contenido de humedad gravimétrica a partir de una muestra de suelo es la siguiente:

1. Colectar una muestra de suelo a la profundidad deseada. Es común usar una barrena para acceder a la profundidad deseada.
2. Remover la muestra de suelo de la barrena y colocarla en un recipiente (bote) de peso conocido (M_b). Si no se pesa la muestra en campo, se requiere sellar el bote con cinta plástica para su transporte.
3. Pesar con una balanza la muestra con el bote (M_{shb}).
4. Evaporar el agua presente en la muestra, colocando la muestra en una estufa por 24 hrs a una temperatura de 105°C.
5. Sacar la muestra de la estufa y esperar a que se enfríe para pesar la muestra del suelo con el bote (M_{ssb}).

Utilizar la siguiente ecuación alterna de la ecuación 3.1 para estimar el contenido gravimétrico de la muestra de suelo.

$$\theta_m = \frac{\text{masa del agua en la muestra}}{\text{masa de la muestra seca}} 100 = \frac{M_{shb} - M_{ssb}}{M_{ssb} - M_b} 100 \quad (3.7)$$

El método gravimétrico no requiere calibración (es directo), es barato y válido para la mayoría de los suelos y rangos de contenido de humedad. Existen varias desventajas en este método, como el tiempo y las actividades requeridas para estimar el contenido de humedad de una muestra de suelo (muestreo, transporte, secado y pesado), alteración del sitio de muestreo, pérdidas de peso debido a la oxidación de materia orgánica o evaporación del agua estructural, el manejo y transporte de la muestra está sujeto a evaporación potencial. A menudo es necesario contar con una estimación de la densidad aparente para expresar el contenido de humedad gravimétrico resultante (θ_m) en unidades volumétricas (θ_v).

Aunque la estimación del contenido de humedad es simple de obtener ya que no se requiere estimar el volumen de la muestra, existen varias expresiones de interés

como los requerimientos de riego de los cultivos que se expresan en unidades de lámina de agua por lo que se requiere estimar el contenido en términos de humedad volumétrica.

Para estimar el contenido de humedad del suelo en forma volumétrica se utilizan los pasos presentados en la sección anterior para obtener el contenido de humedad gravimétrico, con la necesidad de obtener el volumen de la muestra de suelo (V_t) extraída en campo. El contenido de humedad volumétrico se obtiene con la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{M_{ag}}{V_t} = \frac{M_{shb} - M_{ssb}}{V_t} \quad (3.8)$$

Determinación empírica de las constantes de humedad

Por la simplicidad en obtener las fracciones texturales de un suelo, son propiedades físicas generalmente disponibles para la mayoría de los suelos agrícolas, se han desarrollado ecuaciones empíricas para estimar las constantes de humedad en función de las fracciones texturales.

En un proyecto de calendarización del riego en tiempo real realizado en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, se calibraron y validaron las siguientes ecuaciones empíricas para estimar dos de las constantes de humedad necesarias para estimar la humedad aprovechable en el suelo:

$$\theta_{cc} = 0.3486 - 0.0018(\text{arena}) + 0.0039(\text{arcilla}) + 0.0228(MO) - 0.0738(\rho_a) \quad (3.9)$$

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004(\text{arena}) + 0.0044(\text{arcilla}) + 0.0122(MO) - 0.0182(\rho_a) \quad (3.10)$$

Donde los porcentajes de las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) están dados en %, MO es el contenido de materia orgánica en porcentaje de masa con respecto al suelo seco(%) y ρ_a es la densidad aparente (g/cm^3). Las constantes de humedad (θ_{cc} y θ_{PMP}) se expresan en unidades volumétricas (cm^3/cm^3).

Saxton *et al.* (1986) propusieron las siguientes ecuaciones para evaluar las constantes de humedad en forma volumétrica:

$$\theta_{cc} = \left(\frac{0.3333}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3.11)$$

$$\theta_{pmp} = \left(\frac{15}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3.12)$$

Donde las constantes a y b son evaluadas de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$a = \exp(-4.396 - 0.0715 \text{ arcilla} - 4.88 \times 10^{-4} \text{ arena}^2 - 4.285 \times 10^{-5} * \text{arena}^2 * \text{arcilla}) \quad (3.13)$$

$$b = -3.14 - 0.00222 * \text{arcilla}^2 - 3.484 \times 10^{-5} * \text{arena}^2 * \text{arcilla} \quad (3.14)$$

El contenido de humedad a saturación puede estimarse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\theta_s = 0.332 - 7.251 \times 10^{-4} * \text{arena} + 0.1276 * \log(\text{arcilla}) \quad (3.15)$$

Nota: Los cálculos de la ecuación anterior se realizan con el logaritmo base 10.

Las ecuaciones empíricas son sólo una aproximación y no deben substituir a la estimación en campo o laboratorio, por lo que deben usarse como una primera aproximación ante la falta de valores experimentales.

Por ejemplo si se tiene que el porcentaje de arena es el 10% y el de arcilla el 30%, los correspondientes valores calculados son: $\theta_{pmp} = 0.1656$, $\theta_{cc} = 0.3423$, y $\theta_s = 0.513$, todos expresados en cm^3/cm^3 .

3.2.10 Lámina de riego (L_r)

La lámina de riego (L_r) se define como la cantidad de agua en unidades lineales (usualmente centímetros) o carga de agua que se aplica sobre la superficie del suelo para cumplir con los requerimientos de riego de un cultivo. La siguiente relación permite estimar la lámina de riego en función del volumen (V) aplicado sobre un área (A):

$$L_r = \frac{V}{A} \quad (3.16)$$

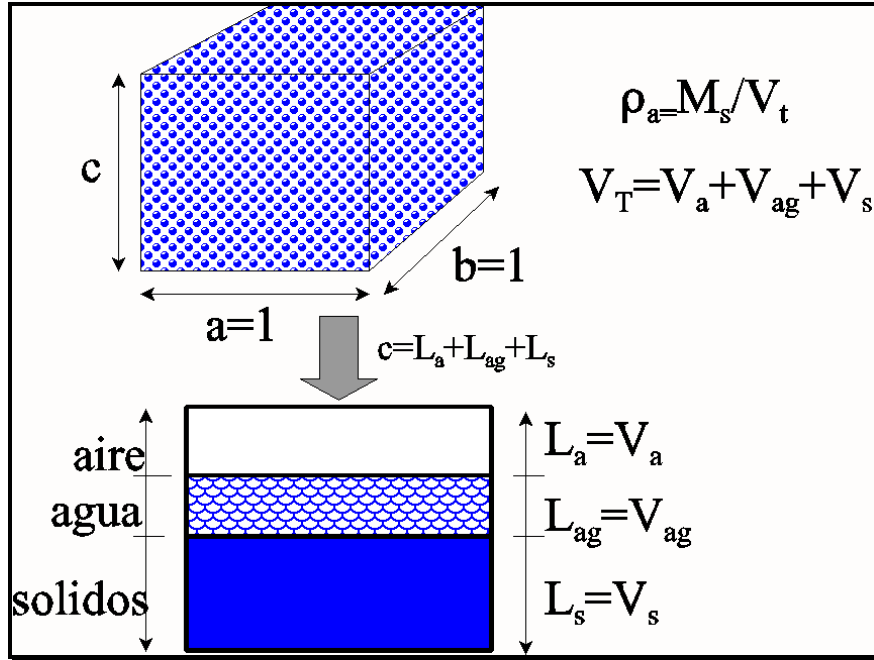


Figura 3.4 Relación entre volumen y lámina para una área unitaria

La **Figura 3.4** muestra la relación entre volumen y lámina en un cubo de área unitaria ($a = b = 1$). Se observa que porcentaje de agua en el volumen de suelo corresponde a la lámina de agua asumiendo un área unitaria.

Tabla 3.7 Conversiones útiles en la medición del agua

Unidad	Equivalencias
1 lps = 1 l/s	3.6 m ³ /hr
1000 m ³	1,000,000 litros
1 acre-pie	325,900 gal
1 cm	100 m ³ /ha
1 m	10,000 m ³ /ha = 10 millares m ³ /ha
1 pulgada	27,158 galones/acre
1 ft ³	7.48 gal
1 acre	0.41 ha
1 m	100 cm = 3.28 ft

Diferentes unidades son usadas para expresar el volumen. En los países bajo el sistema inglés, es común usar el acre-pie o acre-pulgada para expresar un volumen o una lámina aplicada en un acre. Por ejemplo, un acre-pie indicaría una lámina de riego de un pie en una superficie de un acre. En el sistema métrico es común expresar el volumen en millares de m³ o litros. La **Tabla 3.7** presenta algunas conversiones útiles en la estimación de volumen y lámina.

El contenido de humedad volumétrico (θ_v) tiene una relación directa con el concepto de lámina de riego, por ejemplo, se tiene un cubo de 1 m³ de suelo con un

contenido de humedad volumétrico de $\theta_v = 0.3$, si se extrae toda el agua del suelo, se puede formar una capa o lámina de agua de 30 cm de espesor ($100 \text{ cm} * 0.3$), en un área de 1 m^2 .

La siguiente ecuación permite calcular la lámina de riego (L_r) para incrementar el contenido de humedad volumétrico, expresado en forma decimal, de un valor inicial θ_{v1} a un valor final θ_{v2} con una profundidad P_r .

$$L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1}) P_r = \Delta\theta_v P_r \quad (3.17)$$

Donde P_r es la profundidad de mojado y $\Delta\theta$ es el incremento en contenido de humedad.

El contenido de humedad puede expresarse, además de las unidades volumétricas (L^3/L^3) y gravimétricas (m/m), en términos de lámina de agua por unidad lineal de profundidad de suelo (L/L). Por ejemplo, 30 cm de lámina por metro de suelo es equivalente a un contenido de humedad volumétrico de $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

$$\text{Es decir: } L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1}) P_r \therefore (\theta_{v2} - \theta_{v1}) = \Delta\theta_v = \frac{L_r}{P_r}$$

Si: $L_r = 30 \text{ cm}$, $P_r = 100 \text{ cm}$, $\theta_{v1} = 0$, y se requiere calcular θ_{v2} entonces:

$$\theta_{v2} = \theta_{v1} + \frac{L_r}{P_r} = 0 + \frac{30}{100} = 0.30 \text{ cm/cm de suelo}$$

La humedad aprovechable puede expresarse en términos de lámina, tal como se muestra en la **Tabla 3.5** por ejemplo un valor de 10 cm/m de suelo es equivalente a 10% en porcentaje volumétrico de humedad.

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \Delta\theta_v = \frac{L_r}{P_r} = \frac{10}{100} = 0.1 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Si el contenido de humedad está dado en unidades gravimétricas la ecuación anterior incluye la densidad aparente relativa:

$$L_r = (\theta_{m2} - \theta_{m1}) \rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (3.18)$$

Si la humedad final (θ_{m2}) e inicial (θ_{m1}), en unidades gravimétricas, es el contenido de humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente, respectivamente, entonces la lámina para llevar el suelo a capacidad de campo, asumiendo un contenido de humedad inicial a punto de marchitamiento permanente está dado por la siguiente ecuación:

$$L_r = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (3.19)$$

La profundidad efectiva de la zona radical depende de la etapa y tipo de cultivo. Cada cultivo tiene asociado una profundidad efectiva de exploración máxima tal como lo muestra la **Figura 3.5**.

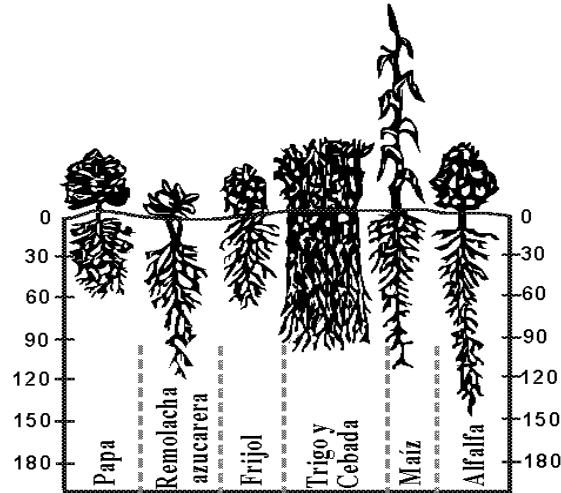


Figura 3.5 Profundidad efectiva radical máxima en centímetros sin restricciones de crecimiento.

Ejemplo de cálculo de una lámina de riego. Se desea regar un cultivo de maíz con una profundidad radical de 120 cm en un suelo franco con un contenido de humedad volumétrico de 20% y se desea aumentar su contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo obtenida *in situ* con un valor de 30%. La lámina de riego a aplicar es de $(0.30 - 0.20) \times 120 = 12\text{cm}$.

Según los datos anteriores si se tiene un terreno de 100 m por 50 m (0.5 ha), el volumen de suelo de la zona radical es de $100\text{ m} \times 50\text{ m} \times 1.2\text{ m} = 6000\text{ m}^3$. El volumen del agua presente en el suelo antes del riego es de $6000\text{ m}^3 \times 20\% / 100 = 1200\text{ m}^3$. El volumen de agua a aplicar al terreno es de $0.12\text{ m} \times 100\text{ m} \times 50\text{ m} = 600\text{ m}^3$.

La **Figura 3.6** muestra gráficamente que si se aplica una lámina de 10 cm en un suelo cuyo contenido de humedad gravimétrico inicial es $\theta_{mi} = 0.15\text{ g g}^{-1}$ y una densidad aparente de $\rho_a = 1.25\text{ g cm}^{-3}$, la profundidad de mojado sería de 100 cm si se considera un contenido a capacidad de campo $\theta_{mcc} = 0.23\text{ g g}^{-1}$.

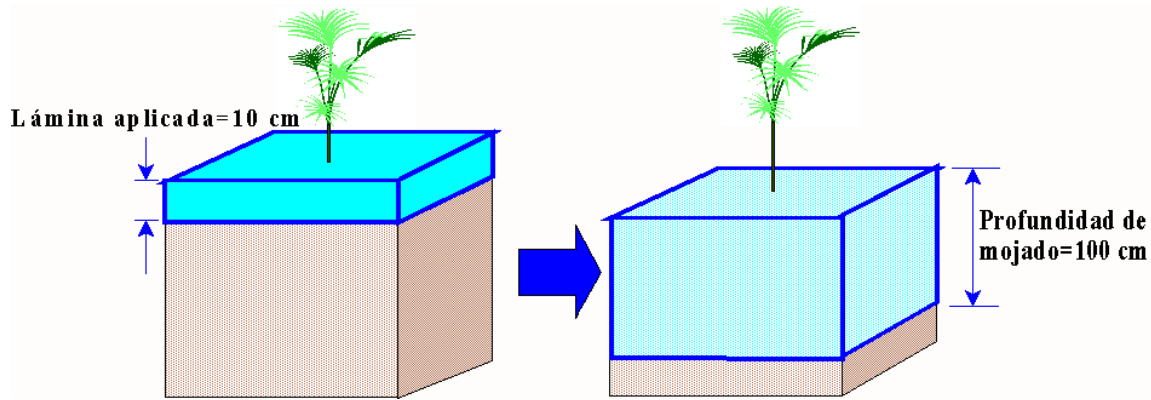


Figura 3.6 Una lámina de 10 cm moja una profundidad de 100 cm asumiendo $\rho_a = 1.25 \text{ gr cm}^{-3}$, $\theta_{mcc} = 0.23 \text{ gr gr}^{-1}$ y $\theta_{mi} = 0.15 \text{ gr gr}^{-1}$.

La **Tabla 3.8** muestra la profundidad de mojado alcanzada al aplicar un centímetro de lámina para valores promedio de los suelos de la **Tabla 3.5** bajo diferentes contenidos de humedad. Se observa una gran profundidad de mojado en suelos arenosos con altos contenidos de humedad. Por ejemplo, un centímetro de lámina aplicado a un suelo arenoso con un contenido de humedad volumétrico de 14% (90% de la HA) llevaría a capacidad de campo a una profundidad de 121.2 cm.

Tabla 3.8 Profundidad de mojado al aplicar una lámina de 1 cm en diferentes suelos de la *tabla 3.5*. Las unidades de la humedad son en porcentaje.

Suelo	Arenoso	Fr. Arenoso	Franco	Fr. Arcilloso	Fr. Limoso	Arcilloso
CC (g g^{-1})	9	14	22	27	31	35
PMP (g g^{-1})	4	6	10	13	15	17
ρ_a (g cm^{-3})	1.65	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
CC ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	5	8	12	14	16	18
PMP ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	5	8	12	14	16	18
HA ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	8.25	12	16.8	18.9	20.8	22.5
HA(cm/m)	8.25	12	16.8	18.9	20.8	22.5
Humedad disponible (% de HA)	contenido volumétrico de humedad (θ_v) en %					
30	9.075	12.6	19.04	23.22	25.74	28
50	10.725	15	22.4	27	29.9	32.5
60	11.55	16.2	24.08	28.89	31.98	34.75
80	13.2	18.6	27.44	32.67	36.14	39.25
90	14.025	19.8	29.12	34.56	38.22	41.5
	Profundidad de mojado (cm)					
30	17.3	11.9	8.5	7.6	6.9	6.3
50	24.2	16.7	11.9	10.6	9.6	8.9
60	30.3	20.8	14.9	13.2	12.0	11.1
80	60.6	41.7	29.8	26.5	24.0	22.2
90	121.2	83.3	59.5	52.9	48.1	44.4

Aunque el contenido de humedad de un suelo proporciona importante información, no es suficiente para explicar completamente el estatus del agua en el suelo. Los agricultores conocen por sentido común que se requiere de otros conceptos para explicar por qué las plantas muestran un comportamiento hídrico disimilar cuando son cultivadas en suelos diferentes pero con el mismo contenido de humedad y por qué existe movimiento de agua en dos suelos con diferente textura pero con el mismo contenido de humedad al ponerlos en contacto. Aún más, suelos diferentes pero con el mismo manejo tienen contenidos de humedad diferentes. Para poder explicar estas preguntas se requiere introducir el concepto de potencial del agua en el suelo relacionado con el estado energético del agua en el suelo, lo que se hace posteriormente.

3.3 ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA EN EL SUELO

El agua en el suelo contiene energía principalmente de energía potencial, o de posición, ya que el movimiento del agua en el suelo tiene velocidades tan pequeñas que su energía cinética se puede despreciar. La alta variabilidad, espacial y temporal, en la energía potencial del agua en el suelo es la fuerza motora que define el sentido y cantidad de flujo obedeciendo el principio universal de movimiento de las zonas de alta a las de baja energía (gradiente del potencial negativo) para mantener un equilibrio dinámico.

Para que exista movimiento del agua en el suelo se requiere de la acción de fuerzas que realicen una cantidad de trabajo, en virtud de su energía potencial almacenada, a este trabajo se le conoce como potencial, el cual expresa la energía potencial específica del agua del suelo con respecto a un estado de referencia estándar.

Numerosas fuerzas actúan sobre el agua del suelo, en las cuales se incluyen: la fuerza de atracción ejercida por las superficies de las partículas del suelo conocida como potencial mátrico, la atracción de iones disueltos por las moléculas de agua es el potencial osmótico; la fuerza debida a la atracción de la gravedad conocida como potencial gravitacional y la fuerza debida a la presión del agua acumulada en un punto de interés se conoce como potencial hidrostático.

La suma de todos los potenciales genera el potencial total y define el estado energético del agua en el suelo. El flujo de agua va hacia donde el potencial total disminuye. De todos estos potenciales parciales, el más importante desde el punto de vista agrícola es el potencial mátrico ya que está relacionado con la fuerza que las raíces deben desarrollar para absorber el agua retenida en el suelo. Aunque el potencial osmótico tiene poco efecto en el movimiento del agua líquida en el suelo, es de suma importancia para otros procesos como la absorción del agua por las plantas.

El potencial se puede expresar en unidades de energía por unidad de volumen lo que resulta en unidades de presión (bar, Pa), el cual puede pensarse como la presión que se tiene que aplicar para remover el agua presente en el suelo. Si el suelo se

encuentra saturado, prácticamente no se requiere presión para desalojar el agua ya que ésta se drena por gravedad. El método más simple y conveniente para expresar el potencial es como energía por unidad de peso que es lo mismo que expresarlo como presión hidrostática o columna de agua equivalente, la cual es la altura de una columna de agua que alcanza una presión dada.

Como el agua del suelo usualmente se encuentra retenida en contra de la fuerza de gravedad su presión o potencial mátrico es negativo. Para evitar manejar valores negativos, se introdujo el término tensión o succión, que representa la misma magnitud del potencial del suelo pero con signo positivo.

El potencial mátrico es la afinidad de las partículas del suelo en su conjunto para retener el agua. El potencial mátrico está relacionado con la altura que asciende el agua en tubos de diámetro pequeño (tubos capilares), a este fenómeno se le conoce como capilaridad, a menor diámetro mayor es el ascenso del agua en el tubo. La capilaridad resulta de una combinación de la tensión superficial (fuerzas de cohesión) del agua y su tendencia a mojar superficies sólidas (adhesión). A medida que uniones entre el agua y la superficie sólida se forman, el agua en el capilar empieza a ascender, generándose un menisco (superficie curvada) dentro de la interfase líquido-aire en el tubo capilar. La curvatura del menisco en la interfase aire-agua está en equilibrio con las diferencias de presión de las dos fases. Si el agua es pura y la interfase es plana, la presión es la misma en ambos lados de la interfase. Si la interfase es curvada, la presión es mayor en el lado cóncavo de la interfase por una cantidad que depende del radio de la curvatura y la tensión superficial del fluido.

Si un tubo fuera colocado en mercurio líquido, el cual no moja al vidrio, la tensión superficial disminuiría el nivel del líquido, en lugar de incrementar, y el menisco sería convexo y no cóncavo como en el caso del agua. Por ejemplo, bajo temperaturas ambientales, el agua ascenderá cerca de 3 cm en un tubo capilar de 1 mm. En un tubo de 0.125 mm el agua ascenderá más de 25 cm. Lo anterior es de suma importancia para los procesos de transporte de fluidos que se presentan en la planta y en el suelo.

Si se tiene una muestra de suelo con un suministro de agua en la parte inferior, el agua asciende debido a las fuerzas capilares presentes en el suelo. La altura de ascenso será mayor en el suelo que tenga mayor porcentaje de partículas pequeñas. La razón se debe a que los poros del suelo actúan como tubos capilares. Dentro del suelo se forman una gran cantidad de meniscos que mantienen el agua unida a las partículas del suelo en contra de la fuerza de gravedad. A menor diámetro del poro, mayor es su capacidad para retener agua y mayor es la energía que debe ejercer la raíz para extraerla. Si el valor de la tensión superficial del agua fuera menor, el suelo no podría retener grandes cantidades de agua, y ésta se drenaría rápidamente resultando en mayores y más frecuentes aplicaciones de riego. La tensión superficial del agua para una interfase agua-aire a una temperatura de 20 °C es de 72 ergs/cm².

Aunque la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo es importante, existe una gran cantidad de procesos que se presentan en el suelo, como el movimiento del agua, la absorción del agua por las raíces, que no son determinados

únicamente por la cantidad de agua presente sino, en mayor parte, por el estado energético presente.

Como el agua en el suelo está sujeta a la fuerza de gravedad, ésta se movería hacia abajo indefinidamente si no existieran otras fuerzas contrarias a la gravedad. La principal fuerza que se opone a la gravedad es la succión, esto es, el suelo ejerce una succión sobre el agua que evita se mueva hacia abajo. Como el agua en el suelo está bajo la influencia de la succión, su habilidad para realizar trabajo (estado energético) es menor que el agua libre con la misma temperatura, elevación y presión. De esta manera, se dice que el agua del suelo se encuentra a menor potencial que el agua libre en condiciones similares.

Hasta ahora se ha asumido que se tiene agua pura (sin sales). Sin embargo, las sales disueltas en el agua aumentan la fuerza que debe ejercer la planta para extraerla, ya que al disolverse se forman iones que son cubiertos por “esferas” de solvatación de moléculas de agua que hacen más difícil su extracción, el agua es menos libre de moverse. Lo anterior trae consigo una disminución (más negativo) en el potencial conocido como osmótico. En consecuencia el agua se mueve de la zona de menor concentración (mayor potencial) a las de mayor concentración de sales disueltas (menor potencial). Si a un suelo sin problemas de sales que se encuentra a un potencial mátrico de -1 bar, se le agrega agua salada con un potencial osmótico de -4 bares, se genera un potencial total de -5 bares dificultándose grandemente la extracción de agua realizada por las plantas. Al absorber las plantas el agua del suelo, rápidamente se alcanzaría el valor crítico que indica la necesidad del riego, aun cuando el contenido de humedad sea alto.

3.3.1 Curva característica de retención del agua en el suelo

Una vez que la zona de raíces ha sido delimitada, se requiere determinar el potencial y el contenido de humedad de interés en la zona radical, el cual es muy útil para definir el déficit de humedad a cualquier tiempo. El potencial mátrico del agua en el suelo (h) describe el nivel de energía con que el agua está retenida en las partículas del suelo. La relación entre el contenido de humedad y la energía con que se encuentra retenida en el suelo (potencial) se conoce como curva de retención de humedad.

La retención de humedad varía grandemente entre diferentes suelos. Es prácticamente imposible establecer una relación directa entre el contenido de humedad y la respuesta de la planta ya que dos suelos pueden tener el mismo contenido de humedad con respuestas completamente diferentes. En cambio si el contenido de humedad es expresado en términos de energía, es posible comparar el estado energético del agua en suelos con propiedades contrastantes y su posible efecto en el rendimiento. A medida que el contenido de humedad disminuye, se requiere mayor esfuerzo para separarla de las partículas del suelo, porque el potencial mátrico es menor.

La **Figura 3.7** muestra varias curvas típicas de retención de humedad para varios suelos con características contrastantes. La forma de la curva define las tensiones de retención del agua en el suelo y la cantidad de energía que las raíces deben superar para extraerla del suelo. Un suelo arcilloso tiene mayor contenido de humedad que un suelo arenoso para la misma tensión.

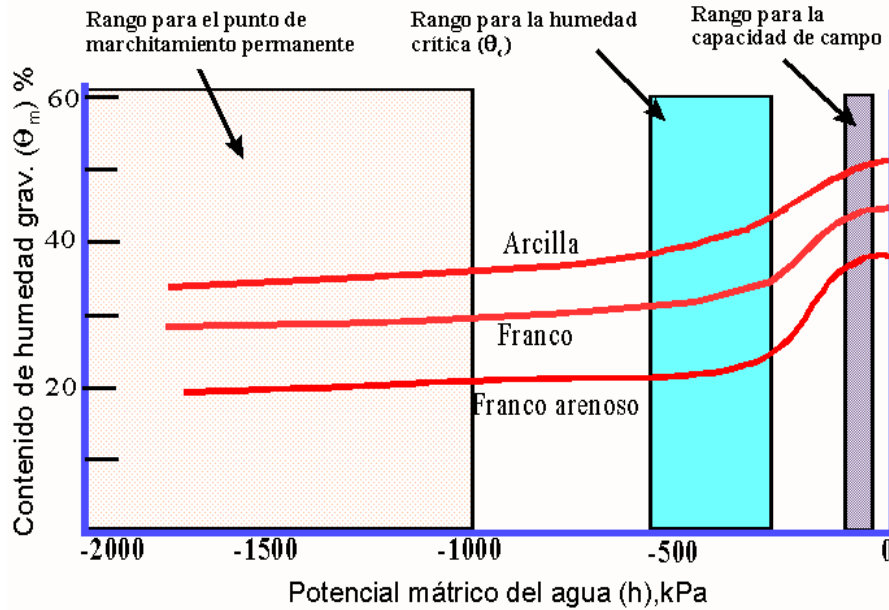


Figura 3.7 Curvas características de tres suelos agrícolas, adaptada de Cuenca (1989).

La **Figura 3.7** muestra que el factor de abatimiento hídrico (f) debe ser mucho menor en un suelo arcilloso que en un suelo franco arenoso. La razón de lo anterior obedece a que los suelos arcillosos tienen mayor capacidad de retención de agua, pero ésta se encuentra retenida con mayor fuerza y para el mismo contenido de humedad, la planta necesita mayor energía para extraerla en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso.

La **Tabla 3.9** muestra la variación de la humedad aprovechable (HA) en función de la tensión para varias texturas de suelo.

Tabla 3.9 Valores de la humedad aprovechable (mm/m) en función de la tensión del suelo (Rijtema, 1969)

Textura	Tensión (atm)			
	0.2	0.5	2.5	15
Arcilla pesada	180	150	80	0
Arcillo limosa	190	170	100	0
Franca	200	150	70	0
Franco limosa	250	190	50	0
Franco arcillo limosa	160	120	70	0
Franco arcillo arenosa	140	110	60	0

Textura	Tensión (atm)			
	0.2	0.5	2.5	15
Franco arenosa	130	80	30	0
Arena fina-limosa	140	110	50	0
Arena fina-Media	60	30	20	0

El estado energético del agua en el suelo es de suma importancia en la obtención de máximos rendimientos. La **Figura 3.8** muestra el rango de tensiones permitidas para obtener máximos rendimientos.

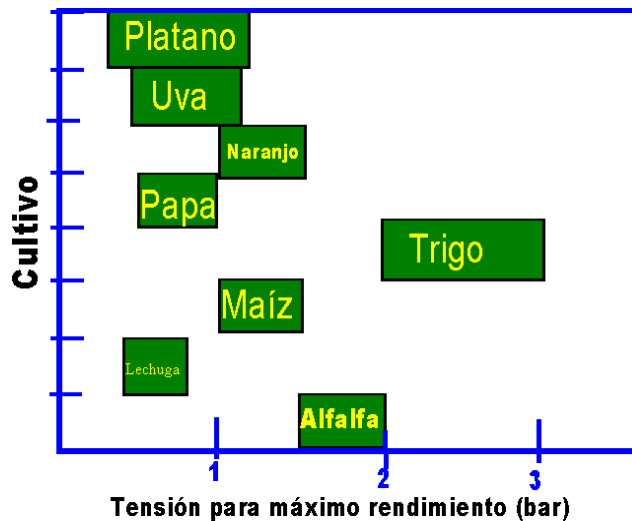


Figura 3.8 Rango de tensiones del suelo para obtener máximo rendimiento (Lomas y Levin, 1979).

3.3.2 Constantes de tensión del agua en el suelo

Las constantes de tensión del agua en el suelo están relacionadas con las constantes de humedad del suelo. Se ha estimado que el valor de capacidad de campo se presenta a tensiones en el rango entre 0.1 y 0.33 bares.

El contenido de humedad a marchitamiento permanente se presenta entre 7 a 20 bares, dependiendo del cultivo y condiciones atmosféricas. Se ha tomado un valor de 15 bares como la tensión en el punto de marchitamiento permanente. El cambio en el contenido de humedad entre 7 y 20 bares es pequeño en comparación a los cambios que se presentan para tensiones menores a 7 bares.

3.3.3 Movimiento del agua en el sistema SPA (suelo-planta-atmósfera)

El sistema suelo-planta-atmósfera es continuo. El movimiento del agua en la planta se debe al funcionamiento de un sistema hidráulico que inicia con la absorción del agua por las plantas, continúa con el transporte en los conductos de la planta (xilema) hasta

los estomas donde el agua es transpirada a la atmósfera. Este movimiento se debe al cambio en el gradiente del potencial del agua. El agua se mueve de mayor a menor potencial. La **Tabla 3.10** muestra los valores del potencial del agua para un cultivo transpirando bajo condiciones normales. La **Tabla 3.11** Presenta la variación del potencial del agua en función de la humedad relativa del aire atmosférico o edáfico.

Tabla 3.10 Valores del potencial del agua para el sistema suelo-agua-atmósfera

Componente	Potencial del agua (MPa)
Suelo	>-0.1
Superficie radical	≈-0.3
Xilema	≈-0.7
Capa límite	<-10
Aire	< -30

Tabla 3.11 Potencial del agua (a 25°C) a diferentes humedades relativas

Humedad relativa (%)	Potencial del agua (MPa)
100	0
99.8	-0.03 (≈ capacidad de campo)
99.6	-0.6
99.0	-1.4 (≈ punto de marchitamiento permanente)
98.0	-2.8
92.0	-11.5
80.0	-30.7
50.0	-95.5
20.0	-222

3.4 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El objetivo del riego no sólo es aplicar la cantidad correcta y oportuna del agua, se requiere que ésta se concentre en las zonas de raíces para lo cual se requiere tener un conocimiento de las leyes físicas que gobiernan el flujo del agua en el suelo en función de los parámetros que definen sus características.

La predicción del movimiento del agua líquida en el suelo es compleja obedeciendo a los cambios de potenciales del agua en el suelo. El agua está sujeta a varias fuerzas o potenciales que actúan en el suelo, por un lado está la fuerza gravitacional que atrae el agua hacia el subsuelo, por otro, la fuerza capilar que atrae el agua hacia los poros pequeños actuando en todas direcciones. En estado gaseoso, el vapor de agua se difunde en la fase gaseosa del suelo como producto de la diferencia de temperatura entre dos regiones del suelo.

El diseño y manejo del agua a escala parcelaria requiere de un conocimiento del movimiento potencial que el agua puede tomar al aplicarla al suelo. El agua aplicada al suelo puede tomar principalmente las siguientes rutas: moverse horizontalmente o

verticalmente en el perfil del suelo debido a la acción de fuerzas gravitacionales y capilares. Un porcentaje del agua aplicada es retenida y almacenada en el suelo ya que el suelo es un medio poroso que consiste de alrededor de 50% de partículas sólidas y 50% de espacio poroso. En segundo término, el agua puede ser extraída por la raíces de las plantas para ser incorporada en el desarrollo de nuevos tejidos vegetales, sin embargo la mayoría del agua extraída por las plantas es liberada a la atmósfera en forma de vapor a través de pequeños poros localizados en las hojas de las plantas conocidos como estomas. Este proceso es llamado transpiración y está activo durante las horas diurnas del día. La transpiración del agua de las plantas se le considera un “uso benéfico” y no como pérdida. Por último, si el agua permanece cerca de la superficie o encharcada, puede perderse por evaporación antes de moverse en el perfil del suelo. La evapotranspiración de los cultivos y evaporación del suelo son ampliamente discutidos en el Capítulo 5.

El movimiento del agua en el suelo obedece a diferencias en el estado energético del agua en el suelo, fluyendo de los puntos de mayor energía o potencial (mayor humedad) a los de menor energía hasta alcanzar un estado de semiequilibrio.

3.4.1 Conductividad Hidráulica a Saturación (K_s)

Todos los poros conducen agua cuando el suelo se encuentra saturado. La conductividad hidráulica a saturación es un parámetro del suelo asociado con la velocidad del agua en un suelo saturado bajo un gradiente de potencial unitario. Comúnmente se define a la conductividad hidráulica a saturación como una constante de proporcionalidad entre el gradiente del potencial (i) y la velocidad de flujo del agua (v_s) en un suelo saturado, expresado en la forma de la ecuación de Darcy:

$$v_s = -K_s i \quad (3.20)$$

Donde el signo negativo está relacionado con la dirección del flujo con respecto a los ejes de referencia y a la consideración que el flujo es de mayor a menor potencial.

Una estimación empírica de K_s , expresada en cm/h, fue propuesta por Saxton *et al.*, (1986) con la siguiente estructura:

$$K_s = e^{\left(12.012 - 0.0753 \text{arena} + \frac{-3.895 + 0.03671 \text{arena} - 0.1103 \text{arcilla} + 8.7546 \times 10^{-4} \text{arcilla}^2}{0.332 - 7.251 \times 10^{-4} \text{arena} + 0.1276 \log(\text{arcilla})}\right)} \quad (3.21)$$

Donde los valores de arena y arcilla están dados en porcentaje y el logaritmo (log) es base 10. Por ejemplo si se tiene que el porcentaje de arena es del 10% y el de arcilla del 30%, el correspondiente valor de K_s es de 0.5891 cm/hr.

3.4.2 Infiltración

La infiltración se define como el proceso por medio del cual el agua pasa a través de la superficie y se distribuye en los estratos del suelo. La velocidad con que se infiltra el

agua, llamada velocidad o tasa de infiltración instantánea (i), es de suma importancia en el diseño y operación de un sistema de riego. La lámina de agua que se ha infiltrado en un tiempo dado se conoce como infiltración acumulada (I). La **Figura 3.9** muestra la tendencia típica de la velocidad de infiltración (i) de un suelo, al inicio la velocidad es alta y a medida que el tiempo transcurre la tasa disminuye y eventualmente alcanza un valor constante. La infiltración acumulada se incrementa rápidamente a tiempos cortos hasta alcanzar una pendiente constante cuando la velocidad de infiltración alcanza un valor constante.

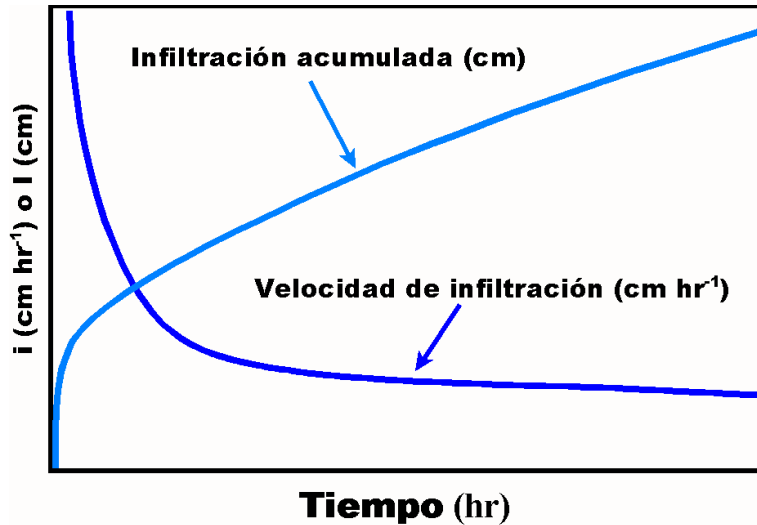


Figura 3.9 Curvas típicas para la velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada de un suelo.

Existe una diversidad de ecuaciones para representar el proceso de infiltración. La mayoría de estas ecuaciones son de naturaleza empírica en el sentido que sus coeficientes carecen de sentido físico. Estos parámetros son obtenidos, en la mayoría de las veces, usando la técnica de regresión para ajustar los datos observados al modelo propuesto. La estructura de la ecuación usada por el Departamento de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos para estimar la infiltración acumulada I es:

$$I = at^b + c \quad (3.22)$$

Donde:

I : es la infiltración acumulada en cm.

t : es el tiempo en min.

a , b y c : son parámetros de regresión.

El SCS definió varias familias de curvas de infiltración donde el número de familia depende de la velocidad de infiltración para tiempos largos en pulgadas/hr. Así la familia de curvas 0.1 significa que el suelo alcanza un valor de 0.1 pulgadas/hr para tiempos largos. La **Tabla 3.12** presenta los valores a y b para diferentes familias de curvas definidas por la ecuación 3.22. El valor de c es 0.6985.

Tabla 3.12 Parámetros de la ecuación de infiltración acumulada de acuerdo al Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos

Familia	a	b
0.1	0.0620	0.6610
0.2	0.0771	0.6988
0.3	0.0925	0.7204
0.4	0.1064	0.7356
0.5	0.1196	0.7475
0.6	0.1321	0.7572
0.8	0.1560	0.7728
1.0	0.1786	0.7850
2.0	0.2753	0.8080
4.0	0.4445	0.8230

La velocidad de infiltración (i) puede estimarse al derivar la expresión de I con respecto a t como:

$$i = \frac{dI}{dT} = \frac{d(at^b + c)}{dt} = abt^{b-1}$$

Es posible simular el proceso de infiltración y distribución del agua en el suelo usando soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del agua, los parámetros de las propiedades hidrodinámicas que requieren estas soluciones son difíciles y laboriosas de obtener en campo por la naturaleza heterogénea del suelo en espacio y tiempo. Por estas restricciones de las soluciones numéricas, su uso se restringe a trabajos de investigación y están fuera del alcance práctico que requiere la calendarización del riego de grandes zonas de riego.

Datos de la infiltración de un suelo son obtenidos en campo con la ayuda de un infiltrómetro de doble cilindro. La **Figura 3.10** muestra éste dispositivo operando en campo para medir la infiltración a través del cambio de niveles del agua en el cilindro interno.

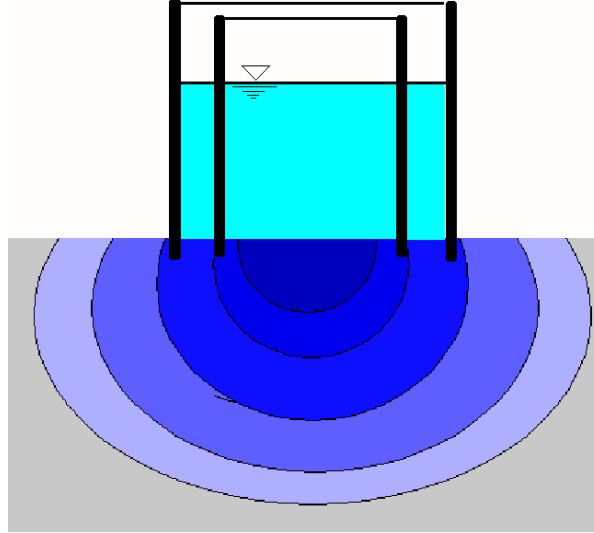


Figura 3.10 Infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración en campo

3.5 EFICIENCIA Y UNIFORMIDAD DEL RIEGO

Ante la competencia que se ejerce sobre los recursos hidráulicos no sólo entre agricultores sino también con los usuarios no agrícolas, se requiere un uso más eficiente de estos limitados recursos. Ante este panorama es imprescindible la estimación de indicadores que permitan evaluar el riego, ya sea durante un evento de riego o durante un ciclo agrícola que incluye varios riegos, ya sea como un criterio de manejo y diseño de un sistema de riego o ya sea como un criterio de operación y aplicación del riego en campo. Históricamente la evaluación del riego se ha asociado intuitivamente con el término de eficiencia. El problema, tal como fue mencionado por Burt *et al* (1997), es que el concepto de eficiencia se ha aplicado de diferente manera por diferentes autores usando el mismo nombre. La uniformidad es otro indicador de la evaluación espacial del riego que se usa frecuentemente. En la imprecisión de su significado ambos términos, eficiencia y uniformidad, se han usado indistintamente. Ningún indicador de la eficiencia del riego proporciona totalmente información del grado de uniformidad y eficiencia del riego, algunos solamente consideran lo que sucede dentro del suelo, ignorando los volúmenes perdidos sobre la superficie del suelo, otros solamente consideran un evento del riego, mientras que otros consideran intervalos de tiempo más amplios como un ciclo agrícola.

Al terminar un riego es común preguntar ¿qué tan bien se aplicó? Sin embargo, la mayoría de las veces se responde con base en la problemática presentada para aplicar el riego. Pocas veces se realiza pensando en el cumplimiento de las necesidades hídricas de las plantas y en la uniformidad con la que se distribuyó el agua de riego en la parcela, principalmente debido a lo difícil y costoso que resulta estimar estos parámetros.

El término eficiencia es comúnmente definido por medio de una ecuación que relaciona las entradas con las salidas de un sistema. Desde el punto de vista económico, la eficiencia de riego puede ser definida como la ganancia obtenida con relación a la inversión en el costo del agua. Los problemas de este enfoque son varios: muchos de los insumos o beneficios del sistema no son fácilmente cuantificables en términos monetarios, los costos y precios varían en tiempo y espacio, y muchas veces son difíciles de predecir a largo plazo.

Existen términos cuantitativos como eficiencia o uniformidad del riego que tienen sentido físico y una expresión matemática para su evaluación. A continuación se presentan los principales indicadores que definen el nivel de eficiencia del riego tanto a escala parcelaria como de una zona o sistema de riego.

- Uniformidad de distribución (U_d).
- Eficiencia de aplicación (E_a).
- Eficacia del riego (EF).
- Coeficiente de Uso Consuntivo¹ (CUC).
- Sagacidad del Riego (S_r).
- Eficiencia del Riego (E_r).
- Eficiencia en el uso del agua (E_u).

A continuación se explican a detalle cada uno de los diferentes indicadores más comunes relacionados con la eficiencia y uniformidad del riego.

3.5.1. Uniformidad de distribución (U_d)

La uniformidad del riego es una medida de la homogeneidad con que el riego se aplicó espacialmente en el terreno. Una uniformidad del 100% indica que todas las porciones del terreno recibieron la misma cantidad de agua, sin embargo, es importante recalcar que todos los sistemas de riego aplican más agua en algunas porciones del terreno. Algunos métodos de aplicación del riego potencialmente tienen alta uniformidad de aplicación. Aunque la uniformidad depende en gran medida de la variabilidad del suelo, otro factor importante es la variabilidad en la aplicación del agua del sistema de riego que depende de los procesos de diseño, instalación, manejo y mantenimiento del sistema.

Para generalizar la aplicabilidad del concepto de uniformidad sin importar el sistema de riego y tipo de cultivo, Burt *et al.* (1997) introdujeron el concepto de elemento que se define como la unidad más pequeña del terreno en cuya superficie la

¹ El Uso Consuntivo de un cultivo considera el agua evapotranspirada hacia la atmósfera y aquella que permanece almacenada en las plantas de dicho cultivo.

variabilidad de aplicación no es significativa. Para frutales el área elemental es la superficie bajo la cual se concentran sus raíces, para cultivos densos, el área elemental son los puntos donde existen plantas en el terreno. De esta manera un valor de $U_d = 1$ indicaría que cada área elemental del terreno recibe la misma cantidad de agua. En gramíneas por ejemplo, un valor de $U_d = 1$ indica que cada planta recibe la misma cantidad de agua.

De esta manera, un estimador de la uniformidad de distribución (U_{d-P}) se define como la relación de las láminas elementales aplicadas menores con respecto a su promedio. La ecuación tiene la siguiente estructura:

$$U_{d-P} = \frac{\text{lamina infiltrada parte inferior}}{\text{lamina infiltrada}} = \frac{L_P}{L} \quad (3.23)$$

Donde:

L_P : es el promedio de la fracción inferior P de las láminas infiltradas en cada unidad elemental, ordenadas de menor a mayor.

L : es la lámina promedio infiltrada en todas las áreas elementales.

P : es la fracción decimal de las áreas elementales que son consideradas para estimar la lámina promedio inferior. Un valor de $P = 0$ indica que L_P es estimada con el valor mínimo de todas las láminas elementales.

Un estimador de L_P para elementos de tamaño variable puede realizarse usando un promedio ponderado con base en su área de aplicación. Un estimador común de U_d es conocido como coeficiente de uniformidad del cuarto bajo (para $P = 0.25$) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$U_{d-CB} = \frac{L_{0.25}}{L} \quad (3.24)$$

Donde:

$L_{0.25}$: es el promedio del 25% de la fracción inferior de las láminas infiltradas elementales ordenadas de menor a mayor.

Es importante hacer una distinción entre los valores calculados a partir de datos de campo (U_d) y los valores potenciales (PU_d). La **Tabla 3.13** muestra los valores potenciales del coeficiente de uniformidad para sistemas de riego con un buen diseño:

Tabla 3.13 Coeficientes de uniformidad potenciales (PU_d) en porcentaje, para sistemas de riego bien diseñados y un valor de $P = 0.25$.

Sistema de riego	PU_d (%)
Aspersión permanente bajo follaje en frutales	94
Movimiento lineal	92
Goteo en frutales	90
Surcos con pendiente	89
Surcos a nivel	87
Bordos en franjas	85
Goteo en cultivos en hilera	85
Aspersión portátil	75-85

La estadística universal de la uniformidad es la varianza (σ^2) de la población o el coeficiente equivalente llamado coeficiente de variación (CV). Este último evaluado con la siguiente expresión:

$$CV = \frac{\sigma}{L} \quad (3.25)$$

Donde:

CV: es el coeficiente de variación.

σ : es la desviación estándar de las láminas de riego acumuladas, ponderadas con respecto al área elemental.

L : es la lámina de riego promedio aplicada.

Existe una relación entre el coeficiente de variación y la uniformidad del riego (U_d). Diferentes expresiones estadísticas para estimar la uniformidad del riego han sido propuestas al asumir diferentes funciones de distribución de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SU_d = 1 - K_p CV \quad (3.26)$$

Donde:

SU_d : es el coeficiente de la uniformidad de distribución estadística.

K_p : es un coeficiente que depende del tipo de función de distribución y fracción de las láminas infiltradas usadas para estimar el valor de U_d .

Hart y Reynolds (1965) derivaron la siguiente relación, asumiendo una función de distribución normal para las láminas infiltradas y un valor de $P = 0.25$ (cuarto bajo):

$$SU_{d-0.25} = 1 - 1.27 CV \quad (3.26a)$$

Para $P = 0.5$, Hart y Reynolds (1965) derivaron la siguiente relación:

$$SU_{d-0.5} = 1 - 0.798 CV \quad (3.26b)$$

3.5.2. Eficiencia de aplicación (E_a)

No toda el agua aplicada se infiltra uniformemente en el suelo debido a limitaciones físicas durante el movimiento del agua sobre y bajo la superficie del suelo, a la variabilidad en los niveles de humedad en el suelo y a las inevitables pérdidas evaporativas por la acumulación del agua en el suelo y hojas. La **Figura 3.11** muestra el comportamiento del agua aplicada al finalizar un riego en surcos abiertos.

La eficiencia de aplicación (E_a) es un indicador que permite evaluar si un evento de riego cumplió con las expectativas de aplicar la lámina requerida en cada unidad elemental de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{L_r}{L} \quad (3.27)$$

Donde:

L_r : es la lámina promedio de riego que contribuye a la lámina objetivo (requerida) para ese evento de riego. La lámina objetivo o requerida se conoce como lámina neta (L_n).

L : es la lámina promedio aplicada que también se conoce como lámina bruta (L_b).

Usualmente la lámina promedio requerida (L_r) se consideraba como la fracción de la lámina aplicada que contribuye a reducir el déficit hídrico en la zona radical, sin embargo, puede considerarse la lámina para lavado de sales o para otros usos benéficos desde el punto de vista agronómico.

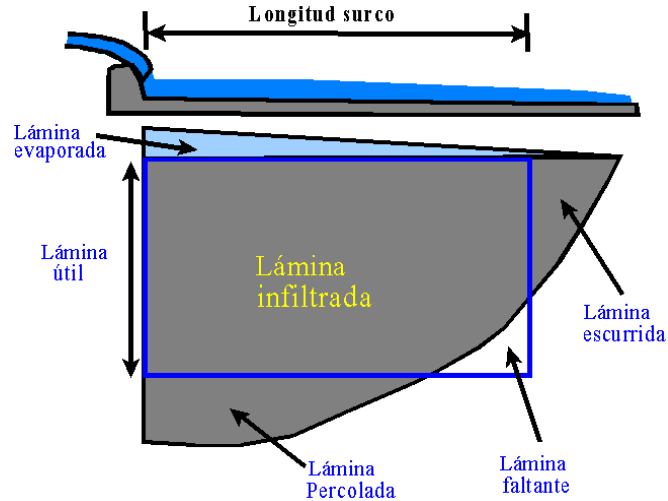


Figura 3.11 Distribución de la lámina aplicada en un riego en surcos.

La eficiencia de aplicación potencial (PE_a) es la máxima eficiencia de aplicación que se puede obtener durante un evento de riego minimizando la percolación profunda sin subirrigar de acuerdo a las limitaciones distributivas del sistema de riego usado. El máximo valor de E_a se alcanza durante un riego al momento que la lámina promedio en la fracción inferior de las láminas aplicadas (L_P) sea igual a la lámina requerida (L_r). Un estimador de PE_a está dado por la siguiente ecuación:

$$PE_a = \frac{L_r}{L_{CB}} \quad (3.28)$$

Donde:

L_{CB} : es la lámina promedio aplicada en el cuarto bajo tal que $L_{CB} = L_r$.

En la **Figura 3.12** se presentan diferentes escenarios de la uniformidad y eficiencia de aplicación de un riego. El caso A de la figura muestra lo que sería un riego ideal con una eficiencia de aplicación del 100% y un coeficiente de uniformidad de uno. La lámina de riego requerida es aquella que contribuye a mantener una profundidad de raíces bajo condiciones óptimas dada usualmente por la lámina para satisfacer el déficit hídrico del suelo y para el control y lavado de sales. A la lámina para el control de sales se le considera una percolación benéfica. El caso A se aproxima a un riego (posiblemente bajo riego por aspersión) que termina con alta eficiencia de aplicación y uniformidad. En riego por surcos se presentan dos escenarios, el caso B donde el riego termina tempranamente y se deja una zona sin aplicar con la lámina requerida, otra donde se cumple plenamente con la lámina aplicada pero por tiempos largos del riego se aplica más lámina que la requerida y se pierde una parte por percolación innecesaria (caso D). En el caso C la eficiencia de aplicación disminuye debido a las características particulares del método de aplicación del riego de aplicar mayor cantidad de agua en un extremo de la parcela como es el caso de las variantes del riego por gravedad.

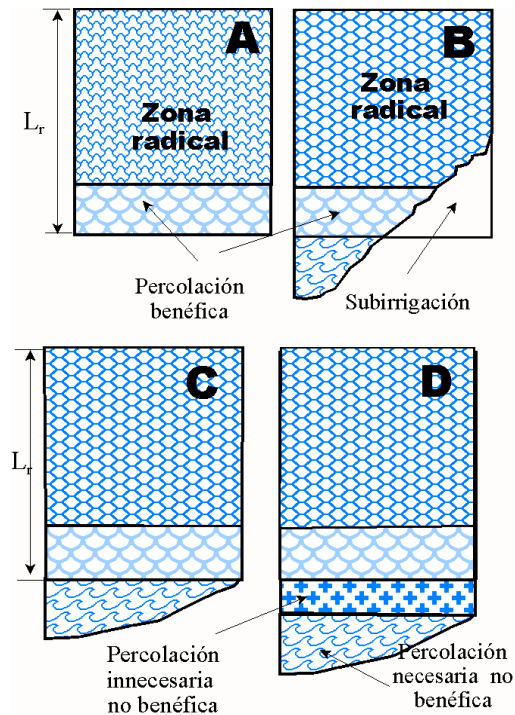


Figura 3.12 Diferentes escenarios de eficiencia y uniformidad que pueden presentarse al finalizar el riego.

La **Tabla 3.14** presenta las eficiencias de aplicación típicas en los principales sistemas de riego. Por ejemplo para aplicar una lámina neta de 1 cm se requiere aplicar una lámina de 1.1 cm bajo un sistema de riego con una eficiencia del 95%.

Tabla 3.14 Eficiencias de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm.

Sistema de riego	Ef. Aplicación (%)	Cantidad de agua requerida (cm) para poner un centímetro en la zona de raíces
Gravedad		
Surcos	35-85	1.2-2.8
Surcos corrugados	30-55	1.8-3.8
Melgas a nivel	60-85	1.2-1.7
Melgas en pendiente	55-75	1.3-1.8
Inundación sin control	15-35	2.8-6.7
Impulsos	50-85	1.2-2.0
Aspersión		
Lateral estacionario o portátil (side roll)	60-85	1.2-1.7
Lateral fijo	60-85	1.2-1.7
Cañón viajero	55-80	1.2-1.8
Cañón estacionario	50-75	1.3-2.0

Sistema de riego	Ef. Aplicación (%)	Cantidad de agua requerida (cm) para poner un centímetro en la zona de raíces
Pivote central de alta presión	65-85	1.3-1.5
Pivote central de baja presión	75-90	1.1-1.3
Lateral de Avance frontal Movimiento lineal	80-90	1.1-1.2
Microirrigación		
Goteo	80-95	1.05-1.2
Asperjador o nebulizador	75-90	1.1-1.3

Nota: Bajo condiciones de viento y amplio espaciamiento entre aspersores, los sistemas por aspersión presentan menores eficiencias que las mostradas en la tabla anterior.

3.5.3 Eficacia del riego (EF)

Es posible obtener altas eficiencias de aplicación subirrigando la parcela. Toda la lámina de agua aplicada contribuye a satisfacer los requerimientos de riego de la zona objetivo, por lo que es necesario un nuevo parámetro indicativo del grado de eficacia de riego expresada, esta vez, en términos de comparar la lámina riego que se aplica al cultivo respecto de la lámina de agua que éste en verdad requiere. De esta forma se está evaluando que tan adecuado o conveniente es el riego que se aplica al cultivo.

$$EF = \frac{L_p}{L_r} \quad (3.29)$$

Donde L_p es la lámina aplicada de riego y L_r es la lámina requerida de riego.

Un estimador usual de EF es dado para $P = 0.25$ con la siguiente relación:

$$EF = \frac{L_{0.25}}{L_r} \quad (3.30)$$

Un valor de $EF < 1$ indica que el tiempo de riego fue corto (subirrigación), un valor de uno indica que el riego fue oportuno (deseable), mientras que un valor de $EF > 1$ indicaría que el tiempo de riego fue largo (sobrerriregación).

Hasta ahora se han presentado indicadores que estiman la eficiencia y uniformidad de un evento de riego, sin embargo, existen otros indicadores donde el intervalo de tiempo es más amplio, por ejemplo entre dos riegos, durante un ciclo agrícola completo. De manera similar, hasta ahora se ha asumido la zona de riego objetivo ocupado por el volumen de suelo bajo una parcela o parte de una parcela a una profundidad que puede ser la profundidad de raíces, sin embargo, algunas veces la zona objetivo puede ser una o más parcelas que constituyen una o más zonas de riego de un distrito de riego, dependiendo del objetivo del indicador de eficiencia del riego.

3.5.4 Coeficiente de uso consuntivo (CUC)

El coeficiente de uso consuntivo (CUC) define la fracción del volumen de riego aplicado y movable que es usado para satisfacer el uso consuntivo¹ del cultivo en un periodo de tiempo.

$$CUC = \frac{V_{UC}}{V_m} \quad (3.31)$$

Donde:

V_{UC} : es el volumen del riego usado para satisfacer el uso consuntivo de los cultivos.

V_m : es el volumen de riego aplicado que se mueve fuera de la zona objetivo del riego de acuerdo a la siguiente relación:

$$V_m = V_a - \Delta V \quad (3.32)$$

Donde:

V_a : es el volumen del riego aplicado a la zona objetivo.

ΔV : es el cambio de volumen de la humedad almacenada en suelo con respecto al periodo de análisis.

Los volúmenes de agua del escurrimiento superficial y subsuperficial, la percolación profunda y el lavado de sales no se consideran para satisfacer el uso consuntivo del cultivo. Sin embargo, la evapotranspiración de malezas, la pérdida de agua por evaporación durante el riego se consideran para fines de uso consuntivo de los cultivos.

3.5.5 Sagacidad del riego (S_r)

No siempre el agua de riego que deja una zona de riego es agua perdida, por razones sociales o ambientales, ese volumen puede considerarse benéfico. Para considerar este tipo de agua se ha incorporado el indicador denominado sagacidad del riego que puede evaluarse con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_{ru}}{V_m} \quad (3.33)$$

Donde:

V_{ru} : es el volumen de riego razonablemente usado o benéfico con fines de uso consuntivo, ambiental o social.

¹ El Uso Consuntivo de un cultivo considera el agua evapotranspirada hacia la atmósfera y aquella que permanece almacenada en las plantas de dicho cultivo.

3.5.6 Eficiencia del riego (E_r)

Para el administrador de una zona de riego es indispensable tener un indicador de la eficiencia del riego a escala global, esto es, la zona objetivo del riego es toda la zona del riego, las pérdidas por escurrimiento superficial o subsuperficial de una parcela pueden ser recuperadas aguas abajo y usarse para regar otras parcelas, por lo que esos volúmenes no salen de la zona objetivo del riego. Idealmente se quiere que toda el agua que se aplica al suelo sea para cumplir con los requerimientos hídricos de un cultivo desde el punto de vista agronómico. De esta manera un estimador de la eficiencia de riego esta dada por la relación entre los volúmenes que salen de la zona objetivo del riego y los benéficamente utilizados por la planta:

$$E_r = \frac{V_e}{V_m} = \frac{V_e}{V_a - \Delta V} \quad (3.34)$$

Donde:

V_e : es el volumen de riego aplicado benéficamente usado por los cultivos desde el punto de vista agronómico.

V_a : es el volumen de riego aplicado.

ΔV : es el cambio en volumen almacenado en la zona objetivo del riego.

La definición anterior solamente considera el agua proveniente del riego, eliminado el agua proveniente de otros procesos como por ejemplo, la lluvia y el ascenso capilar. Es posible expresar la eficiencia del riego en términos de láminas, en el entendido que son calculados a partir de volúmenes aplicados sobre la parcelas, y no como láminas infiltradas.

$$E_r = \frac{L_e}{L_m} = \frac{L_e}{L_a - \Delta L} \quad (3.35)$$

Donde:

L_e : es la lámina de riego aplicada benéficamente usado por los cultivos desde el punto de vista agronómico.

L_a : es la lámina de riego aplicada.

ΔL : es el cambio en la lámina almacenada en la zona objetivo del riego.

Uno de los problemas asociados con la estimación de la eficiencia del riego es la definición de agua benéfica que se asume considera como el agua que sirve para mantener la producción de un cultivo desde el punto de vista agronómico. El agua usada en los siguientes procesos se consideran como benéficos

- Evaporación del suelo.
- Transpiración del cultivo.

- Lavado y control de sales.
- Evaporación durante el riego.
- Agua estructural.
- Control de heladas, enfermedades o plagas.
- Mantener las propiedades óptimas del suelo para la labranza del suelo y labores culturales del cultivo.

Entre los procesos no benéficos del agua destacan:

- Lavado de tuberías y emisores.
- Transpiración de malezas.
- Evaporación del follaje.
- Evaporación por almacenamiento del agua sobre la superficie del suelo.
- Escurrimiento y percolación fuera de la zona objetivo ocasionados principalmente por riegos tardíos, baja uniformidad del riego o flujo preferencial en grietas o fracturas.

3.5.7 Eficiencia en el Uso del Agua (E_u)

La **eficiencia en el uso del agua** es otro parámetro que indica cuantitativamente como el agua de riego se traduce en rendimiento, y se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_u = \frac{\text{rendimiento}}{\text{agua aplicada}} \quad (3.36)$$

El parámetro de eficiencia anterior integra una gran cantidad de factores asociados con la frecuencia y cantidad del riego, la fecha de siembra, la variedad, las labores de cultivo, control de plagas y enfermedades. En el norte del estado de Sinaloa se tienen valores de E_u del orden de 1.2 y 0.65 kg/m³ de agua para maíz y frijol, respectivamente (Sifuentes, 1998).

3.6 EJEMPLOS

Ejemplo 3.6.1 Estimar la densidad aparente (ρ_a) y el contenido de humedad volumétrica (θ_v) de una muestra de suelo cilíndrica de acuerdo a los siguientes datos:

$$\begin{aligned}\text{Peso del suelo húmedo} &= M_{sh} = 111.02 \text{ gr.} \\ \text{Contenido de humedad} &= \theta_m = 0.154 \text{ g}^3 \text{ g}^{-3} \\ \text{Volumen muestra} &= V_t = 68.7 \text{ cm}^3.\end{aligned}$$

Resultados:

$$M_s = \frac{M_{sh}}{1 + \theta_m} = \frac{111.02 \text{ g}}{1 + 0.154} = 96.19 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} = \frac{96.19 \text{ g}}{68.7 \text{ cm}^3} = 1.4 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\theta_v = \theta_m \rho_a = 0.154 (1.4) = 0.216 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

Ejemplo 3.6.2 ¿Cuál es el nuevo contenido de humedad volumétrica (θ_v) de la muestra del ejemplo anterior si se le agrega y distribuye uniformemente 1.4 ml de agua, asumir una densidad del agua (ρ_{ag}) de 1 g cm⁻³?

Resultados:

$$\text{Volumen agregado} = \Delta V = \rho_{ag} V_{ag} = 1 \text{ g cm}^{-3} 1.4 \text{ cm}^3 = 1.4 \text{ g.}$$

$$\theta_v = \frac{(M_{sh} + \Delta V) - M_s}{M_s} = \frac{(111.02 + 1.4) - 96.19}{96.19} = 0.2362 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

Ejemplo 3.6.3 Estimar la densidad aparente, contenidos de humedad gravimétrico y volumétrico, y porosidad, asumir una densidad de sólidos (ρ_s) de 2.65 g cm⁻³, de acuerdo a los siguientes datos obtenidos muestras de cuatro estratos de suelo.

Muestra No.	Estrato (cm)	Volumen (cm ³)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)
1	0-30	67.56	110.1	84.45
2	30-40	67.56	105.1	77.69
3	40-55	67.56	102.0	75.12
4	55-100	67.56	93.0	74.11

Resultados:

No.	Estrato (cm)	VOLUMEN (cm ³)	PESO SUELO HÚMEDO (g)	PESO SUELO SECO (g)	ρ_a	θ_m	θ_v	ε
1.0	0-30	67.6	110.1	84.5	1.3	0.303	0.380	0.528
2.0	30-40	67.6	105.1	77.7	1.1	0.353	0.406	0.566
3.0	40-55	67.6	102.0	76.8	1.1	0.328	0.373	0.571
4.0	55-100	67.6	93.0	74.1	1.1	0.255	0.280	0.586

Ejemplo 3.6.4 Después de seis días el suelo del ejemplo anterior ha sufrido cambios debido a evapotranspiración, estimar el contenido de humedad volumétrica y la lámina de riego que hay que aplicar para obtener el contenido de humedad del suelo del ejemplo 1.

MUESTRA No.	Estrato (cm)	PESO SUELO HÚMEDO (g)	PESO SUELO SECO (g)
1	0-30	105.2	83.2
2	30-40	102.1	79.2
3	40-75	98.8	75.4
4	75-100	95.3	76.2

Resultados:

No.	Estrato (cm)	PESO SUELO HÚMEDO (g)	PESO SUELO SECO (g)	ρ_a g cm ⁻³	θ_m (M ³ M ⁻³)	θ_v (L ³ L ⁻³)	$\Delta\theta_v$ (L ³ L ⁻³)	ΔL_r (cm)
1.0	0-30	105.2	83.2	1.3	0.264	0.326	-0.054	-1.62
2.0	30-40	102.1	79.2	1.1	0.289	0.339	-0.067	-0.67
3.0	40-75	98.8	75.4	1.1	0.310	0.346	-0.027	-0.93
4.0	75-100	95.3	76.2	1.1	0.251	0.283	0.003	0.08
Total							-0.145	-3.15

Los resultados indican que el perfil de suelo perdió 3.15 cm de agua por evapotranspiración, por lo que hay que aplicar 3.15 cm para obtener la humedad del ejemplo anterior. Las pérdidas por percolación son mínimas ya que la humedad del último estrato permaneció prácticamente constante ($\theta_v = 0.28$)

Ejemplo 3.6.5 Por error se realizaron los cálculos del contenido de humedad gravimétrico (θ_m) con respecto a la masa del suelo húmedo (M_{sh}) obteniéndose una humedad del 22%, corregir este valor y expresarla en términos de la masa de suelo seco?

Resultados:

$$\theta_m^* = \frac{M_{ag}}{M_s + M_{ag}} = \frac{1}{M_s / M_{ag} + 1} = \frac{1}{1 + 1/\theta_m}$$

Resolviendo para θ_m se obtiene la humedad gravimétrica.

$$\theta_m = \frac{1}{1/\theta_m^* - 1} = \frac{1}{1/0.22 - 1} = 0.282 \text{ g g}^{-3}$$

Ejemplo 3.6.6 Si se aplica una lámina de riego de 10 cm a un suelo con un contenido de humedad volumétrico inicial promedio del 17%, estimar la profundidad del frente de mojado si el contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo es del 28%.

Resultados:

La profundidad de mojado será de 90.9 cm para una lluvia de 10 cm para la condiciones de humedad del suelo dado.

$$P_m = \frac{L_r}{\Delta\theta} = \frac{10 \text{ cm}}{(0.28 - 0.17)} = 90.9 \text{ cm}$$

Ejemplo 3.6.7 Un distrito de riego estima una lámina de riego bruta de 70 cm por hectárea regada con papa. Calcular el volumen neto aplicado a una hectárea, el volumen perdido por conducción y el volumen perdido por percolación si la eficiencia de aplicación es del 60% y la de conducción del 85%.

Resultados:

La lamina se recibe a nivel de toma granja de la red de canales es de 70 cm por hectárea, considerando una eficiencia de conducción de toma a parcela del 85% se tiene una lamina efectiva en la cabecera de la parcela de 59.5 cm, sin embargo solamente están disponibles 35.7 cm a nivel de la zona de raíces al considerar una eficiencia del 60%. El volumen que llega a la toma es de 7,000 m³, de los cuales 5,950 m³ llegan a la cabecera de la parcela y solamente 3,570 m³ se quedan en la zona de raíces. Se pierde un volumen de 1,500 m³ en la regadera de la toma a la parcela, así como 2,380 m³ por percolación profunda fuera de la zona de raíces.

Ejemplo 3.6.8 Se midieron los niveles del agua de un infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración del suelo:

T (min)	0	2	5	10	20	30	45	60	75	90
Nivel (cm)	1.8	4.85	5.35	6	7.3	8.3	10	11.45	11.75	12.05

Resultados:

T (min)	0	2	5	10	20	30	45	60	75	90
Nivel h(cm)	1.8	4.85	5.35	6	7.3	8.3	10	11.45	11.75	12.05
Δh	-	3.05	0.5	0.65	1.3	1	1.7	1.45	0.3	0.3
t (hr)	0	0.033	0.083	0.166	0.333	0.5	0.75	1	1.25	1.5
i (cm/hr)	-	3.05	3.55	4.2	5.5	6.5	8.2	9.65	9.95	10.25
I (cm)	0	91.50	10.00	7.80	7.80	6.00	6.80	5.80	1.20	1.20

Ejemplo 3.6.9 Si el suelo del ejemplo anterior es homogéneo y tiene un contenido de humedad inicial de $0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, estimar la profundidad mojado a 75 y 90 min. Asumir un valor de θ_{cc} de $0.35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Resultados:

Las profundidades de mojado a 75 y 90 min son de 66.3 cm y 68.3 cm, respectivamente.

$$P_m = \frac{I}{\Delta\theta} = \frac{I}{(\theta_{cc} - \theta_i)} = \frac{9.95 \text{ cm}}{(0.35 - 0.2)} = 66.3 \text{ cm}$$

Ejemplo 3.6.10 Estimar la cantidad de humedad aprovechable para el siguiente perfil de suelo, utiliza las ecuaciones (3.9) y (3.10) para evaluar θ_{CC} y θ_{PMP} . Asumiendo un valor de $\rho_a = 1.35 \text{ gr cm}^{-3}$ y un contenido de materia orgánica del 2%:

Estrato	Espesor (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)
1	20	30	10
2	25	40	30
3	55	38	25

Resultados:

Estrato	Espesor (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)	θ_{cc}	θ_{PMP}
1	20	30	10	0.3936	0.2132
2	25	40	30	0.3966	0.2492
3	55	38	25	0.3978	0.2424

Ejemplo 3.6.11 Estimar la humedad fácilmente aprovechable para el suelo del ejemplo anterior, para el cultivo de papa con los siguientes datos:

Etapa	P_r (cm)	f (%)
1	25	80
2	35	50
3	60	40
4	60	70

Resultados:

Etapa 1.

Estrato	P_r (cm)	f	θ_{cc}	θ_{pmp}	HA(%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.8	0.4476	0.2134	0.2342	0.18736	3.7472
2	5	0.8	0.4506	0.2494	0.2012	0.16096	0.8048
3	0	0.8	0.4518	0.2426	0.2092	0.16736	0
Acumulado	25						4.552

Etapa 2.

Estrato	P_r (cm)	f	HA(%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.5	0.2342	0.1171	2.342
2	15	0.5	0.2012	0.1006	1.509
3	0	0.5	0.2092	0.1046	0
Acumulado	35				3.851

Etapa 3.

Estrato	P_r (cm)	f	HA(%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.4	0.2342	0.09368	1.8736
2	25	0.4	0.2012	0.08048	2.012
3	15	0.4	0.2092	0.08368	1.2552
Acumulado	60				5.1408

Etapa 4.

Estrato	P_r (cm)	f	HA(%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.7	0.2342	0.16394	3.2788
2	25	0.7	0.2012	0.14084	3.521
3	15	0.7	0.2092	0.14644	2.1966
Acumulado	60				8.9964

Ejemplo 3.6.12 Estimar la percolación profunda o escurrimiento superficial generada con una lluvia efectiva de 10 cm para el siguiente suelo asumiendo una profundidad radical del 100 cm.

Estrato	Espesor (cm)	θ_{cc}	θ_i
1	20	35	18
2	25	38	25
3	65	30	26

Resultados:

Estrato	Espesor (cm)	θ_{cc} (L ³ L ⁻³)	θ_i (L ³ L ⁻³)	$\Delta\theta$ (L ³ L ⁻³)	L _{max} (cm)
1	20	35	18	17	3.4
2	25	38	25	13	3.25
3	55	30	26	4	2.2
Total	100				8.85

Se observa que el suelo puede almacenar hasta 8.85 cm, por lo que para una lluvia efectiva de 10 cm se generarían 1.15 cm de percolación profunda o escurrimiento superficial.

Ejemplo 3.6.13. Se tienen los siguientes valores del volumen aplicado en litros en 20 unidades elementales de 50 m² (área de influencia de la zona de raíces). Calcular el valor de U_d para valores de P de 0, 0.25 y 0.5.

5404	5398	5287	5316	5224	5187	5120	5197	5189	5110
5017	5108	4960	4990	4817	4987	4776	4666	4677	4586

Resultados:

Las respectivas láminas infiltradas en centímetros para cada elemento, ordenadas de menor a mayor son:

9.172	9.332	9.354	9.552	9.634	9.92	9.974	9.98	10.034	10.216
10.22	10.24	10.374	10.378	10.394	10.448	10.574	10.632	10.796	10.808

El promedio de las láminas es $L = 10.1016$ cm. Los resultados del coeficiente de uniformidad de distribución (U_d) son de 0.908, 0.931, y 0.962 para valores de P de 0, 0.25 y 0.5, respectivamente. Para el caso de $p = 0$ se tiene:

$U_{d-0} = \frac{L_{p=0}}{L} = \frac{9.172}{10.1016} = 0.908$	$U_{d-0.25} = \frac{9.4088}{10.1016} = 0.931$	$U_{d-0.5} = \frac{9.7168}{10.1016} = 0.962$
---	---	--

El valor de $L_{p-0.25}$ se calcula como el promedio del 25% inferior de los valores de las láminas:

$$L_{p-0.25} = \frac{9.172 + 9.332 + 9.354 + 9.552 + 9.634}{5} = 9.4088$$

Ejemplo 3.6.14. Calcular los coeficientes de uniformidad de distribución estadística (SU_{d-p}) para $p = 0.25$ y 0.5 usando las ecuaciones de Hart y Reynolds (1965) y las láminas del ejemplo 3.6.13.

Resultados:

El promedio de las láminas es $L = 10.1016$ cm, la desviación estándar es $\sigma = 0.4862$, el coeficiente de variación es $CV = 0.04814$, por lo tanto $SU_{d-0.25} = 0.939$ y $SU_{d-0.5} = 0.962$, que son muy aproximados a los obtenidos en el **ejemplo 3.6.13**.

Ejemplo 3.6.15. Se realizó una prueba de uniformidad por 150 min de un sistema de aspersión con un espaciamiento entre aspersores de 10×18 m y una descarga promedio de 18 l min^{-1} obteniéndose las siguientes láminas colectadas en mm en botes igualmente espaciados:

17	13	13	18	12
19	15	11	16	19
18	10	9	14	21
16	10	8	13	20

Estimar:

Si la lámina neta requerida es de 30 mm ¿Cuáles son las láminas brutas y tiempos requeridos para regar adecuadamente (eficacia) el 85% y el 95% de la superficie?

Resultados:

N	L_i	P	L_p
1	8	0.05	8.00
2	9	0.10	8.50
3	10	0.15	9.00
4	11	0.20	9.50
5	12	0.25	10.00
6	13	0.30	10.50
7	13	0.35	10.86
8	13	0.40	11.13
9	14	0.45	11.44
10	15	0.50	11.80
11	16	0.55	12.18
12	16	0.60	12.50
13	17	0.65	12.85
14	18	0.70	13.21

N	L _i	P	L _p
15	18	0.75	13.53
16	18	0.80	13.81
17	19	0.85	14.12
18	19	0.90	14.39
19	20	0.95	14.68
20	21	1.00	15.00

Con datos de la prueba de eficacia del riego es:

$$EF = \frac{L_{0.25}}{L_r} = \frac{10\text{mm}}{15\text{mm}} = 0.66$$

Para incrementar los valores de EF de 66% a 85% y 95%, se requiere incrementar el valor de $L_{P-0.25}=10$ mm a 12.75 mm y a 14.25 mm para obtener valores de EF de 85% y 95%, respectivamente.

$$L_{P-AD=0.85} = EF * L_r = 0.85 * 15 = 12.75$$

$$L_{P-AD=0.95} = EF * L_r = 0.95 * 15 = 14.25$$

Por lo tanto el tiempo de riego se debe de incrementar para incrementar los valores de $L_{P-0.25}$, de acuerdo a los siguientes factores:

$$f_{AD-0.85} = \frac{12.75}{10} = 1.275$$

$$f_{AD-0.95} = \frac{14.25}{10} = 1.425$$

Los nuevos tiempos de riego para aplicar una lámina neta de 30 mm e incrementar los valores de EF son:

EF (%)	Tiempo de riego (min)	L _n mm	L _b mm
66	300	30	30
85	382	30	38.2
95	427	30	42.8

Ejemplo 3.6.16 Calcular la eficiencia del riego (E_r) usando los siguientes valores obtenidos durante un ciclo agrícola en una zona de riego de 35 ha.

Sección	Cultivo	L_e (cm)	P_r (cm)	θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_f ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	L_a (cm)
1	Papa	36	60	0.3	0.27	50
2	Maíz	50	100	0.20	0.23	70
3	Trigo	38	90	0.25	0.27	60

Resultados:

Cultivo	L_e (cm)	L_a (cm)	P_r (cm)	$\Delta\theta$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	ΔL (cm)	E_a	E_r
Papa	36	50	60	-0.1	-6	0.72	0.64
Maíz	50	70	100	0.03	3	0.71	0.75
Trigo	38	60	90	0.03	2.7	0.63	0.66

Se observa que al considerar la humedad existente al inicio (θ_i) y al final ciclo (θ_f), se tiene una mejor estimación el volumen aplicado durante el ciclo y en consecuencia de la eficiencia del riego.

Ejemplo 3.6.17 Calcular la eficiencia en el uso del agua (EUA) bajo tres sistemas de riego de papa considerando los siguientes datos obtenidos para la zona de Los Mochis, Sinaloa, México.

Sistema	L_b (cm)	Rendimiento (ton ha^{-1})
Gravedad	60	32
Aspersión	45	45
goteo	37	48

Resultados

Sistema	L_b (cm)	Rendimiento (ton ha^{-1})	Volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	EUA (kg m^{-3})
Gravedad	60	32	6000	5.3
Aspersión	45	45	4500	10.0
goteo	37	48	3700	13.0

"El murmullo del agua es la voz de mis antepasados"
Seattle, Gran Jefe Indio Estadunidense

**Indicadores de
riego**

4

CAPITULO 4

INDICADORES DE RIEGO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

4.1 INTRODUCCIÓN

Para que las plantas puedan realizar sus funciones de crecimiento, tanto biológicas como físicas, una serie de condiciones deben cumplirse; una de las más importantes es la absorción y movimiento del agua desde las raíces hasta la atmosfera, para ello el suministro en la zona de absorción debe ser garantizado. Cuando esto no es así, se dice que es necesario el riego.

El riego consiste en suministrar de manera artificial el agua a los cultivos cuando las aportaciones de agua naturales son insuficientes para sostener un ciclo de cultivo o parte de este. Con el riego se reduce el riesgo de bajo o nulo rendimiento en regiones donde la precipitación es incierta en su distribución o baja en cantidad. En zonas áridas muy pocos cultivos pueden crecer sin el riego. Para obtener máximos beneficios del riego, se debe conocer con precisión cuánto y cuándo aplicarlo.

Uno de los mayores logros de la agricultura en la actualidad, es la posibilidad de aportar puntualmente el riego y mantener la disponibilidad del agua en el momento en que la planta la requiere. Con el auxilio de sistemas de medición y monitoreo, idealmente se conocen los requerimientos hídricos de los cultivos, los cuales se asemejan a una curva continua similar al comportamiento de la radiación solar, creciente en el día y prácticamente nula durante la noche. Derivado de esta observación, el objetivo del riego, o mejor dicho, el uso eficiente del riego consiste en adaptar la aplicación puntual de este a la curva transpirativa del cultivo, pensado en disminuir el exceso que ocasiona el drenaje, pero también el déficit que se traduce en estrés hídrico y consecuentemente reducción en cantidad y calidad de cosecha.

Mantener la zona de raíz con suficiente agua para que las plantas lo absorban no es tarea fácil, debido a las múltiples variables que provocan algún tipo de pérdida. Las pérdidas de agua ocurren cuando ésta se mueve fuera del alcance de las raíces debido a una diferencia en el gradiente hidráulico, en respuesta a procesos naturales como: escurrimiento superficial o subsuperficial, percolación profunda y evapotranspiración. El escurrimiento superficial se presenta cuando el gasto aplicado es mayor que la infiltración del suelo, moviéndose los excedentes superficialmente fuera del alcance de las plantas a favor de la pendiente. Si el agua se aplica en cantidades mayores a la que el suelo puede retener y almacenar en su espacio poroso, ésta se mueve fuera de la zona de raíces constituyendo lo que se conoce como percolación profunda. La **Figura**

4.1 ilustra gráficamente los principales procesos que ocurren en la frontera de la sección de control contenida por el volumen de raíces.

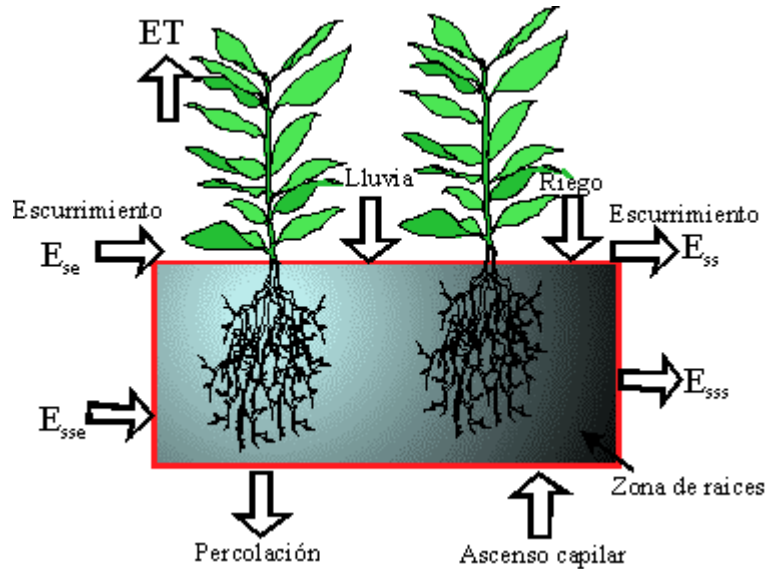


Figura 4.1 Componentes del balance hídrico en la zona radical.

Los cultivos hortícolas contienen en sus tejidos entre 80 y 95% de agua. En consecuencia, su rendimiento y calidad se ven drásticamente afectados ante las limitaciones de agua en el suelo. Una lechuga, por ejemplo, es prácticamente un "saco de agua" con pequeñas cantidades de saborizantes y vitaminas. Como el sistema radical de las hortalizas es pequeño, el retraso del riego de dos o más días puede afectar su rendimiento, en cantidad y calidad.

Para definir el momento del riego se han propuesto diferentes indicadores relacionados con el estrés hídrico de la planta. Cuando un indicador alcanza un valor crítico definido de acuerdo principalmente a estudios experimentales, el riego es aplicado.

La definición de cuándo regar se basa en el uso de indicadores de riego que utilizan alguna propiedad del suelo o de la planta relacionada con el estrés hídrico para definir el momento del riego. Los pasos a seguir para calendarizar el riego usando un indicador de riego X son:

- 1) Definir un valor crítico (x_c) del indicador X .
- 2) Estimar el valor del indicador al inicio del ciclo x_0 .
- 3) Estimar el valor del indicador para el día i , x_i .
- 4) Si el valor del indicador es menor o igual que el crítico ($x_i \leq x_c$), se alcanza el momento del riego, por lo cual se debe aplicar el riego y actualizar el indicador (x_i).
- 5) Actualizar el valor crítico (x_c) del indicador X para el día i .
- 6) Esperar el siguiente día e ir al paso 3.

La **Figura 4.2** muestra la variación temporal del indicador de riego (x_i), se observa que el indicador, debe mantenerse dentro de los dos límites. El riego debe ser aplicado cuando el valor del indicador alcanza el valor crítico y mantenerse por abajo del límite superior. También muestra que se aplicaron 6 riegos y una lluvia. La presencia de lluvia retrasa el riego 2 del programa de riego representado en la misma figura.

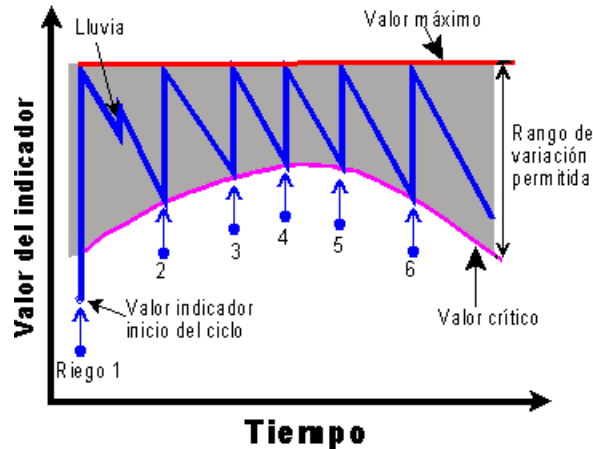


Figura 4.2 Variación de un indicador de riego de acuerdo con la calendarización del riego.

Para obtener buenos rendimientos en términos de calidad y cantidad debe existir un balance entre el agua absorbida y el agua perdida por transpiración de las plantas y evaporación del suelo. Si este balance pudiera cuantificarse en forma rápida y precisa, el problema de estimar el momento del riego estaría resuelto ya que se estarían integrando la mayoría de los factores que definen el grado de sanidad hídrica del cultivo. Ante la complejidad de correlacionar varios de estos factores, se han definido varios métodos para calendarizar el riego aislando algún factor en la forma de un indicador de riego, entre los más importantes se tienen: indicadores edáficos, vegetales, evaporativos, evapotranspirativos o balance hídrico del sistema agua-suelo-planta-atmósfera.

Indicadores de riego:

- 1) De la planta.
 - Color de algún órgano vegetal como hoja o fruto
 - Temperatura de algún órgano vegetal como las hojas
 - Ángulo de inclinación de las hojas respecto del sol
 - Humedad o potencial foliar
 - Grado de enrollamiento de las hojas en cultivos herbáceos
 - Grado de apertura de los estomas
 - Magnitud del flujo de la savia
 - Reflectancia de las hojas
 - Tasa de crecimiento de algún órgano como tallo o fruto
- 2) Edáficos.
 - Contenido de humedad del suelo (humedad aprovechable)

- Potencial del agua del suelo (energía potencial)
 - Conductividad térmica del suelo
 - Humedad relativa del suelo
 - Constante dieléctrica del suelo
 - Temperatura del suelo
- 3) Evaporativos.
- Tanque evaporímetro o evaporativo
 - Atmómetro
- 4) Evapotranspirativos.
- Lisímetros de balance o de pesada
- 5) Balance de humedad.
- Evapotranspirometro de Thornthwhite

4.2 INDICADORES VEGETALES O DE LA PLANTA

Las plantas son organismos primarios con la facultad de generar su propio alimento, en primer grado, a partir de condiciones naturales, agua, dióxido de carbono en presencia de energía (solar); El agua que ingresa a la planta por las raíces y recorre el sistema vascular de esta, cumple diversas funciones, desde las fisiológicas como fotosíntesis y respiración, como mantenerse turgentes y en posición vertical, así como regular la temperatura; por eso, se considera que la planta misma es un sensor que indica el grado de estrés como respuesta a las actividades que se realiza en presencia del agua.

La calendarización de riego mediante indicadores vegetales se basa en el cambio físico de algún órgano de la planta que relaciona el estrés hídrico para definir el momento del riego. Varios indicadores indirectos permiten estimar cualitativamente el grado de estrés hídrico de la planta como son: el color, la temperatura de las hojas, el contenido de humedad de las hojas, el ángulo de las hojas, el grado de enrollamiento de las hojas y la amplitud de la apertura de los estomas.

El cambio de color o forma de algún órgano causado por estrés hídrico es utilizado frecuentemente por los agricultores como indicador de riego. El cambio de color varía según la especie, tipo y posición del órgano. Por ejemplo, las hojas del algodón cambian de verde azul a verde oscuro a medida que se agudiza su estrés hídrico. En algunos cultivos, las hojas se obscurecen a medida que el estrés hídrico se desarrolla. Por ejemplo, las hojas sanas de frijol en etapa vegetativa son de color verde claro y se obscurecen adquiriendo el color de hojas maduras bajo estrés hídrico. Otro indicador vegetal es el grado de enrollamiento de la hoja. La hoja de maíz se enrolla cuando el estrés hídrico es significativo. La tasa de crecimiento del tamaño del fruto o tubérculo es otro indicador que ha sido probado con éxito en los cultivos de tomate, papa, pera, ciruelo y cítricos.

Tradicionalmente los agricultores han dependido de la observación visual de los cultivos para calendarizar el riego, ocasionando muchas veces que el riego se aplique tardíamente, además cuando los síntomas de estrés aparecen, el daño ocasionado puede ser irreversible. En consecuencia se debe tener cuidado cuando se utiliza alguna propiedad o característica de la planta como indicador de riego. Una alternativa es

sembrar otra especie de planta, que funcione como indicador de riego por tener la característica de mostrar síntomas (más sensibles) de estrés hídrico a menor déficit de humedad que las del cultivo de interés.

La reflectancia diferencial de las hojas a la luz infrarroja es una propiedad que ha sido usada para detectar el estrés hídrico mediante fotografías aéreas. El espectro solar, permite discriminar las propiedades de la luz dependiendo de la frecuencia (cantidad de crestas por unidad de tiempo) y con ello establecer frecuencias radiactivas que indican estrés, como es la luz infrarroja, cuya longitud de onda oscila los 1100 nm. Las hojas estresadas por déficit hídrico reflejan menos luz infrarroja, que las hojas de plantas sin problemas por este tipo de estrés.

Entre los indicadores vegetales más objetivos para calendarizar el riego destacan: el potencial hídrico foliar, la conductancia estomática, el índice de estrés hídrico del cultivo y la temperatura foliar. Entre los más importantes se encuentra el potencial hídrico vegetal (PHV) y el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC), los cuales han recibido gran atención para calendarizar el riego en los últimos años.

Uno de los factores necesarios para que el agua se mueva en la planta, es la diferencia de potenciales. El método basado en el potencial hídrico vegetal (PHV) consiste en la evaluación de la tensión o potencial de la savia en el xilema mediante la determinación de la presión necesaria, usando una cámara de presión, para forzar la aparición de una gota de agua en la superficie (de corte) después de separar uno o más órganos vegetales de la planta (por ejemplo, cortar del pecíolo de la hoja). Dicho potencial expresa el nivel energético del agua en las hojas.

Una planta se encuentra bajo mínimo estrés hídrico si requiere baja presión (<300 KPa) para forzar la aparición de agua en una cámara de presión. Presiones mayores que 1500 KPa indicarían altos niveles de estrés hídrico en el cultivo. Valores óptimos del potencial hídrico vegetal dependen del tipo y localización del órgano de la planta, la humedad relativa y temperatura ambiental, y de la hora de muestreo. A medida que la humedad relativa ambiental aumenta, también aumenta el PHV (menos negativo), el sentido se invierte para la temperatura (esto es, al aumentar la temperatura, el PHV disminuye haciéndose más negativo). Existen dos maneras prácticas de medir el PHV, la primera se conoce como potencial xilemático y la segunda como potencial foliar. Para medir el potencial xilemático se envuelven las hojas con un plástico o aluminio para restringir la transpiración, después de un periodo de equilibrio, usualmente de dos horas, se cortan las hojas a nivel del pecíolo para medir la presión a la cual aparezca el exudado xilemático de la hoja. Para medir el potencial foliar, el corte y medición del potencial hídrico de la hoja se realiza inmediatamente después de cubrirla con plástico. El potencial xilemático es menos variable que el potencial foliar debido al mayor tiempo de equilibrio transcurrido al realizar la medición.

El potencial hídrico vegetal tiene varias limitaciones debido a su variación durante el transcurso del día (alcanzando valores mínimos al mediodía), además de ser afectado por la demanda evaporativa de la atmósfera, el contenido de humedad del suelo, la orientación, altura y edad de la hoja.

Otro método simple consiste en obtener la temperatura de la hoja por medio de un termómetro de rayos infrarrojos. La **Figura 4.3** muestra el uso de la pistola de rayos

infrarrojos en campo. El uso del termómetro de rayos infrarrojos permite medir la diferencia entre la temperatura del aire y la del follaje. La diferencia en temperaturas está directamente relacionada con el déficit evapotranspirativo.

El termómetro de infrarrojos estima la temperatura de varias plantas e integra el valor sobre un área de muestreo. Las lecturas se realizan en días soleados, a la misma hora, altura y ángulo de incidencia (comúnmente a 45°).



Figura 4.3 Pistola de rayos infrarrojos operando en campo para medir la temperatura del follaje.

El agua evaporada de una superficie vegetal sirve como un refrigerante a las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. La temperatura de una planta sin problemas de estrés hídrico es de 1 a 3°C por debajo de la temperatura ambiental debido al efecto refrescante de la transpiración, y esta se reduce a medida que se acerca a la superficie de la hoja. Cuando el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con un consiguiente incremento en la temperatura foliar, en algunos casos puede ser superior a la temperatura del aire circundante. La temperatura de un tejido vegetal muerto es similar a la del aire.

La presencia del agua en la planta es crucial en sus procesos fisiológicos. Muchos órganos vegetales contienen una cantidad de agua mayor del 90% de su peso fresco y en pocos casos es menor al 70%. Gracias a sus propiedades, el agua actúa como un regulador de temperatura, lo cual permite que las plantas puedan amortiguar la variación entre altas y bajas temperaturas.

En virtud de que varios indicadores vegetales como el potencial o el contenido de agua de la planta son técnicas destructivas de la muestra vegetal y además restringida a plantas individuales u órganos vegetales, se ha propuesto un método basado en la estimación de la temperatura de las hojas conocido como el método del IEHC (Índice de Estrés Hídrico del Cultivo). Dicho método es el indicador de riego vegetal más usado

para la calendarización del riego por sus características de muestreo global, facilidad, portabilidad y no - destructividad.

El método IEHC se basa en el monitoreo remoto de la temperatura del cultivo usando una pistola de rayos infrarrojos. Ehrler, *et al.* (1978) determinaron que la temperatura de las hojas menos la temperatura del aire arriba del cultivo estaba relacionado directamente con el déficit de presión de vapor atmosférico. La temperatura del cultivo (T_c) tiene un amplio rango de variación con respecto a la ambiental (T_a). Diversas investigaciones han encontrado una diferencia de temperaturas ($T_c - T_a$) de -12°C a 6°C , dependiendo del estado hídrico de la planta y de la demanda evapotranspirativa atmosférica. Idso, *et al.* (1981) normalizaron la relación entre la temperatura del follaje y el aire en varias parcelas con alfalfa para desarrollar el concepto del IEHC. El IEHC es definido de tal forma que una planta no estresada tiene un valor de cero y una completamente estresada tiene un valor de uno. La estructura del IEHC propuesta por Idso, *et al.* (1981) se muestra a continuación:

$$IEHC = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_0}{(T_c - T_a)_1 - (T_c - T_a)_0} = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} \quad (4.1)$$

Donde los subíndices 0 y 1 se refieren a las condiciones del cultivo no estresado y completamente estresado, respectivamente. El subíndice "m" se refiere a las condiciones actuales medidas en campo. T_c y T_a son las temperaturas del follaje y del aire, respectivamente. La diferencia de temperatura depende del déficit de presión de vapor (ΔP), la diferencia entre las presiones de vapor a saturación y actual para la temperatura del aire al tiempo de medición. El uso de IEHC requiere de dos curvas base como las mostradas en la **Figura 4.4**. La curva base inferior es para un cultivo no estresado y la superior para un cultivo completamente estresado.

El siguiente procedimiento permite obtener un estimador del IEHC:

1. Estimar las temperaturas del cultivo $(T_c)_m$ y la del aire $(T_a)_m$ en campo con la ayuda de un termómetro de rayos infrarrojos (Pistola de infrarrojos).
2. Calcular la diferencia de temperaturas actuales, $\Delta T_m = (T_c - T_a)_m$.
3. Obtener el déficit de presión de vapor (DPV_m) para la temperatura del aire al tiempo de medición. Para obtener la humedad relativa se puede usar un aspirómetro.
4. Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo no estresado, $\Delta T_0 = (T_c - T_a)_0$, usando la siguiente ecuación (línea inferior **Figura 4.4**):

$$\Delta T_0 = \alpha_1 - \alpha_2 DPV \quad (4.2)$$

Donde α_1 , y α_2 son parámetros de regresión de la línea base obtenida experimentalmente a partir de mediciones de un cultivo bajo condiciones óptimas de riego. La **Tabla 4.1** presenta los parámetros de la curva base de no - estrés para varios cultivos.

- Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo completamente estresado, $\Delta T_1 = (T_c - T_a)_1$. Para obtener el valor de ΔT_1 en forma experimental se corta la planta y se coloca en su lugar con la ayuda de alambres y se espera un día hasta que la planta no transpire y se mide la temperatura del cultivo estresado $(T_c)_1$. En Nuevo México la diferencia de las temperaturas bajo estrés severo varían de 4°C al inicio del verano a 6°C al final del verano. El valor de ΔT_1 debe ser mayor que el valor de α_1 .
- Calcular el IEHC con la siguiente ecuación:

$$IEHC = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} \quad (4.3)$$

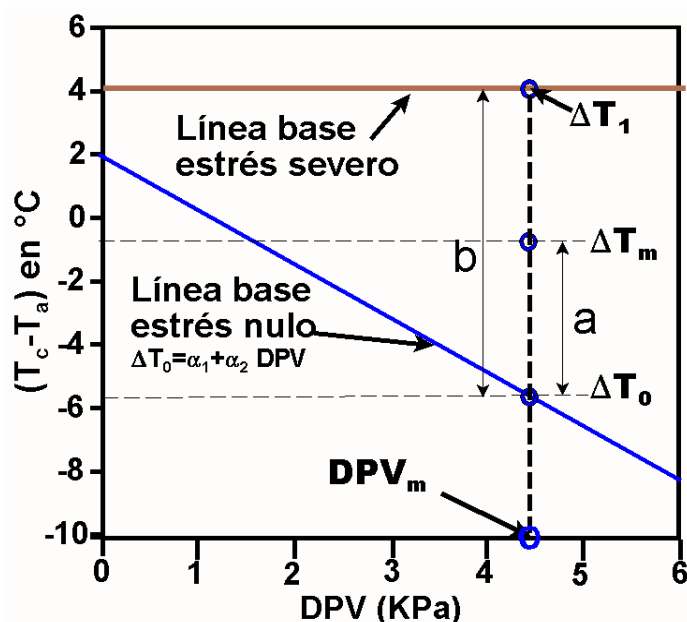


Figura 4.4 Curvas base usadas para el cálculo del IEHC

Tabla 4.1 Coeficientes de la línea base (α_1 y α_2) para cultivos no estresados usando la ecuación 4.2. Reportados por Hanson et al., 1999 para California, USA.

Cultivo	α_1 (°C)	α_2 (°C KPa ⁻¹)
Alfalfa	0.51	1.92
Cebada (AE)	2.01	2.25
Cebada (DE)	1.72	1.23
Frijol	2.91	2.35
Maíz (floración)	3.11	1.97
Algodón	2.06	1.73
Pepino	4.88	2.52
Lechuga	4.18	2.96
Papa	1.17	1.83
Remolacha azucarera	2.5	1.92
Tomate	2.86	1.96
Trigo (AE)	3.38	3.25
Trigo (DE)	2.88	2.11

Nota: AE-antes de espigamiento, DE después de espigamiento.

El riego es aplicado cuando el IEHC alcanza un valor predeterminado experimentalmente como crítico, el cual varía dependiendo del cultivo, suelo y clima particular por lo que muchas veces son necesarios estudios locales de calibración del método para aplicarlo extensivamente en una región. La determinación de los valores críticos ha sido difícil por lo que estos se deben de obtener para cada cultivo bajo condiciones de manejo locales.

El IEHC cuantifica el estrés de la planta por déficit de agua al considerar la relación entre la evapotranspiración real (ET_r) y la transpiración potencial (ET_p) manifestada por la temperatura de la planta relativa a la temperatura del aire. La relación entre transpiración relativa y el IEHC está dada por:

$$\frac{ET_r}{ET_p} = 1 - IEHC \quad (4.4)$$

Aunque se ha probado experimentalmente la validez del IEHC para calendarizar el riego, su aplicabilidad comercial ha sido muy limitada ya que requiere del conocimiento local de la sensibilidad y respuesta del IEHC a parámetros del suelo. Además requiere de estudios previos para definir la frecuencia de medición de temperaturas, profundidad y tipo de suelo relacionado con el IEHC ya que varios factores pueden afectarlo.

Una de las limitaciones más severas del IEHC es que las lecturas de temperatura foliar dadas por el termómetro de rayos infrarrojos son inexactas hasta que el cultivo alcanza una cobertura total, el suelo desnudo generalmente tiene una temperatura mayor que la del follaje. Otro problema se presenta cuando existe nubosidad, alta humedad relativa o baja temperatura del aire. Para compensar estas limitaciones, se pueden usar otros métodos alternativos y/o complementarios, por ejemplo tensiómetros, para calendarizar el riego cuando el uso del IEHC es restringido.

Existen parámetros de difusión para estimar la resistencia de los estomas al intercambio de gases. Este índice de resistencia está relacionado con los requerimientos de agua de la planta. Altas resistencias indican cierre de estomas y altas necesidades de agua. Por su complejidad y laboriosidad, este método está restringido para propósitos de investigación.

Otro método muy prometedor en la actualidad como indicador del momento del riego es la medición del diámetro de los órganos de la planta, principalmente el tallo con la ayuda de dendrómetros. El diámetro del tallo presenta microvariaciones naturales a lo largo del día debido a cambios hídricos en su contenido. Durante el periodo de máxima evapotranspiración presenta contracciones, de orden de varios micrómetros, en el diámetro seguidos por rehidrataciones durante la noche con un consecuente aumento en el diámetro. Bajo condiciones de estrés hídrico, la expansión nocturna decrece y la contracción diurna aumenta. Los cambios en la amplitud del crecimiento diurno-nocturno se pueden asociar a la necesidad del riego.

4.3 INDICADORES EDÁFICOS

Existen varios indicadores edáficos relacionados con el déficit hídrico del suelo: contenido de humedad del suelo, potencial mátrico del suelo y humedad relativa del suelo, entre otros. El común de estos métodos, es que miden la cantidad de energía con la que el agua se encuentra retenida en sus espacios porosos, y por lo tanto la disponibilidad para que pueda ser absorbida por las plantas.

4.3.1 Contenido de humedad (θ)

La calendarización del riego se basa comúnmente en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el desarrollo del cultivo. La **Figura 4.5** muestra los diferentes parámetros asociados con el indicador humedad del suelo. El objetivo de la calendarización del riego usando como indicador la humedad aprovechable del suelo es mantener el suelo entre la humedad crítica y capacidad de campo.

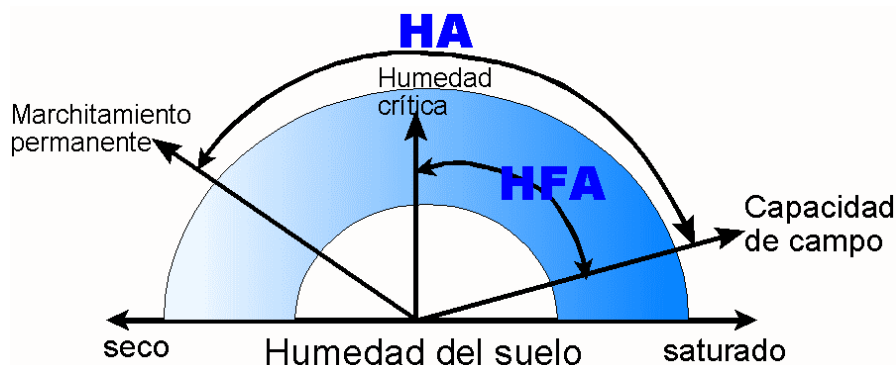


Figura 4.5 Parámetros asociados con el indicador de humedad del suelo

Al momento del riego, el suelo alcanza un contenido de humedad máximo (θ_{max}) y éste disminuye gradualmente a medida que las plantas satisfacen sus requerimientos hídricos diarios. El contenido de humedad puede disminuir hasta ser crítico o mínimo permisible (θ_c). El valor mínimo θ_c es el punto en el cual el riego es aplicado para suministrar de agua a la zona radical en un punto inmediato antes que ocurra el estrés de la planta, usualmente situado entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. El valor crítico varía dependiendo del estado fisiológico del cultivo, tipo de cultivo, variedad, suelo y clima. Si se asume que el indicador de riego es el contenido de humedad, la **Figura 4.2** muestra la variación del contenido de humedad (θ) en función del tiempo, con seis riegos y una lluvia entre los riegos 1 y 2. En la etapa inicial del cultivo, el valor crítico (θ_c) y el intervalo de riego disminuyen poco a poco hasta alcanzar la madurez del cultivo, para posteriormente en la etapa de maduración vuelven a crecer hasta alcanzar la cosecha del cultivo.

Para definir cuánto regar es necesario definir las dimensiones del volumen del suelo a regar, las que dependen de la zona radical del cultivo. Esta zona es finalmente la región potencial donde las raíces pueden extraer agua.

El contenido de humedad máximo (θ_{\max}) se toma como el contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}), sin embargo, puede ser menor sobre todo si existe alta probabilidad de lluvia durante el intervalo para el siguiente riego, un valor podría ser alcanzar el 80% de la humedad aprovechable ($\theta_{\max} = \theta_{PMP} + 0.8 HA$).

Cabe mencionar que este método se refiere estrictamente a cultivos en suelo. Con otras formas de cultivo, ya sea sustratos o directamente cultivos en solución, los límites de estrés están definidos además por el contenido de oxígeno en la zona radicular, y que son el factor limitante en este tipo de sistemas.

En el **Capítulo 3** se presentó la forma de estimar directamente el contenido de humedad usando los métodos gravimétrico y volumétrico. En este capítulo se presentan métodos para estimar el contenido de humedad indirectamente en campo, de los cuales a continuación se discuten los más utilizados.

Método del tacto

El método del tacto es el método más utilizado por los agricultores para definir el momento del riego. Este método consiste en tomar una muestra del suelo para moldearla con las yemas de los dedos. Dependiendo del contenido de humedad y textura del suelo, será el color, consistencia y moldeado de la bola formada. El método es muy propenso a errores subjetivos.

Sonda de neutrones

El método de la sonda de neutrones, conocido también como dispersor, termalizador, o aspersor de neutrones, para determinar el contenido de humedad del suelo se basa en la propiedad de afinidad que los átomos de hidrógeno tienen por dispersar y disminuir su energía cuando chocan con partículas radioactivas de similar diámetro emitidas por una fuente radioactiva. Cuando un neutrón, emitido por una fuente radioactiva a alta velocidad, se coloca en un suelo húmedo inmediatamente es rodeado por una nube de neutrones termalizados (baja velocidad). La densidad de esta nube representa una condición de equilibrio que existe entre la emisión de neutrones rápidos y su termalización y captura por núcleos de hidrógeno. La **Figura 4.6** muestra un aspersor de neutrones operando en campo.



Figura 4.6 Aspersor de neutrones en campo.

El principio físico del método está relacionado con las leyes de conservación del momento y energía, el cual establece que una partícula en movimiento reduce su velocidad cuando choca con una partícula estacionaria con masas igual o menor a la partícula movible. El neutrón es una partícula con masa significativa que puede obtenerse de un material radioactivo, el cual tiene una masa muy cercana a la del átomo de hidrógeno. De esta manera, neutrones emitidos a altas velocidades por una fuente radioactiva, por ejemplo Am - Be, son termalizados por el hidrógeno. Los neutrones termalizados pueden ser detectados por una cámara de BF₃.

La cantidad de neutrones que pueden ser termalizados depende de la concentración de átomos de hidrógeno que se encuentran en el agua del suelo. El dispersor de neutrones está provisto de una sonda, que contiene tanto una fuente radioactiva como un detector de neutrones. La sonda se desliza dentro de un tubo de acceso, comúnmente de aluminio, a la profundidad deseada, donde se toma la lectura de neutrones termalizados. Para una fuente radioactiva dada, la cantidad de neutrones termalizados puede ser relacionada con el contenido volumétrico de humedad. Para estimar el contenido de humedad volumétrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$\theta = C_0 + C_1 \left(\frac{L_s}{L_p} \right) \quad (4.5)$$

Donde C₀ y C₁ son parámetros obtenidos por la técnica de regresión lineal al ajustar datos experimentales al modelo lineal anterior. L_p es la lectura de los neutrones registrados por el detector cuando la sonda se encuentra encerrada en un protector de parafina, la cual se considera como condición estándar, L_s es la lectura del detector cuando la sonda se encuentra a la profundidad deseada. La estimación de los parámetros C₀ y C₁ debe realizarse en campo para cada tipo de suelo. La **Figura 4.7** muestra una curva típica de una sonda de neutrones. Los valores experimentales son

obtenidos usualmente de muestras de suelo obtenidas durante la instalación de los tubos de acceso.

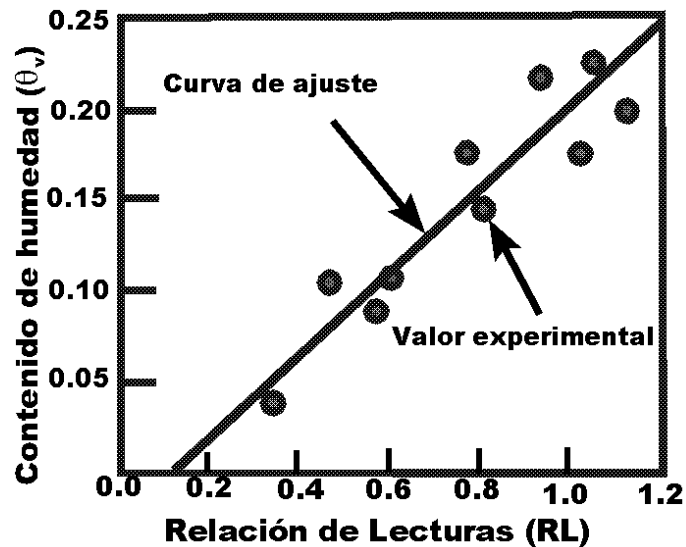


Figura 4.7 Curva de calibración típica de una sonda de neutrones.

La baja resolución espacial del método imposibilita su capacidad para detectar discontinuidades o la presencia de frentes de humedad abruptos en el perfil de humedad. De hecho este método reporta valores promedios de una esfera de muestreo cuyo tamaño cambia con el contenido de humedad. Trabajos experimentales indican que el radio de muestreo varía de 16 cm para saturación hasta 70 cm en suelos muy secos. Otra limitación de este método es la dificultad de muestreo cerca de la superficie del suelo, ya que muchos de los neutrones emitidos se liberan a la atmósfera. La restricción más severa es el requerimiento de licencia por parte del gobierno para el uso de dispositivos con fuentes radioactivas.

Métodos dieléctricos

Los métodos dieléctricos para estimar el contenido de humedad se basan en estimar la constante dieléctrica del suelo (K). La base del método radica en los valores contrastantes entre las constantes dieléctricas del aire ($K \approx 1$), suelo ($K \approx 4$) y el agua ($K \approx 80$). Para un suelo dado a diferentes contenidos de humedad, la constante dieléctrica también cambia. Los métodos dieléctricos se dividen en dos tipos: basados en reflectometría temporal (TDR) y los basados en reflectometría de frecuencia (FDR).

Uno de los métodos más usados para estimar la constante dieléctrica es el método conocido simplemente como TDR por sus siglas en inglés (Time Domain Reflectometry) que consiste en instalar dos o más varillas de acero inoxidable (líneas de transmisión eléctrica) en el suelo, a las cuales se les envía un pulso electromagnético y con un sensor se estima el tiempo de recorrido del pulso electromagnético desde que entra a las varillas hasta que retorna al encontrar una discontinuidad al final de la varilla. La **Figura 4.8** muestra las varillas TDR. El tiempo de recorrido está asociado con las características dieléctricas del medio donde se

encuentran inmersas las varillas. Se requiere de una curva de calibración, usualmente en la forma de un polinomio, para relacionar la constante dieléctrica (K) con el contenido de humedad volumétrico (θ). Como referencia se muestra en la **Figura 4.8** un tensiómetro equipado con un traductor de presión, conocido comercialmente como electrotensiómetro.

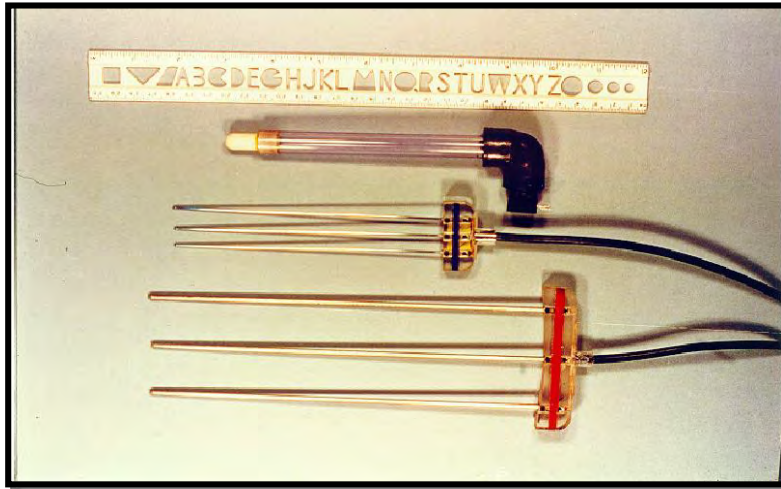


Figura 4.8 Dos varillas tipo TDR para estimar la humedad del suelo. Como referencia se presenta una regla y un minitensiómetro equipado con traductor de presión.

La estimación de la constante dieléctrica (K) se expresa por:

$$K = \left(\frac{v_o}{v} \right)^2 \quad (4.6)$$

Donde v es la velocidad de una onda electromagnética enviada a través de la sonda, v_o es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s). La onda viaja a lo largo de las varillas que tienen una longitud (L), al encontrar la discontinuidad regresa al sensor de voltaje, de esta manera se determina el tiempo de tránsito (t) del pulso en la longitud de recorrido ($2L$), de manera que la velocidad puede ser estimada como:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (4.7)$$

De esta manera la constante dieléctrica se evalúa como:

$$K = \left(\frac{tv_o}{2L} \right)^2 \quad (4.8)$$

La ecuación anterior establece que para conocer el parámetro K es necesario estimar el tiempo de tránsito t para una sonda de longitud L. Usando un osciloscopio es posible determinar gráficamente la longitud electromagnética o aparente, L_a , dada por:

$$L_a = \frac{tV_o}{2} \quad (4.9)$$

Usando la relación anterior, la constante dieléctrica tiene la siguiente estructura:

$$K = \left(\frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (4.10)$$

Como las diferencias entre los valores de K del agua pura ($K \cong 80$) y del suelo seco ($K \cong 5$) son contrastantes, es razonable asumir una fuerte relación entre K y el contenido de humedad que puede expresarse usando un polinomio de tercer grado.

$$\theta(K) = \alpha_0 + \alpha_1 K + \alpha_2 K^2 + \alpha_3 K^3 \quad (4.11)$$

Topp, *et al.*, (1990) después de realizar numerosos experimentos para relacionar la constante dieléctrica (K) con el contenido de humedad volumétrico para una variedad de tipos de suelos bajo diferentes contenidos de humedad volumétrico presentó la siguiente ecuación:

$$\theta(K) = -0.053 + 0.0292 K - 5.5 (10^{-4}) K^2 + 4.3 (10^{-6}) K^3 \quad (4.12)$$

La **Figura 4.9** muestra la tendencia típica de los valores ajustados y experimentales entre el contenido de humedad volumétrico y la constante dieléctrica. Para aplicar el método de la reflectometría es necesario obtener los parámetros de la curva de regresión a partir de datos experimentales obtenidos en campo o laboratorio.

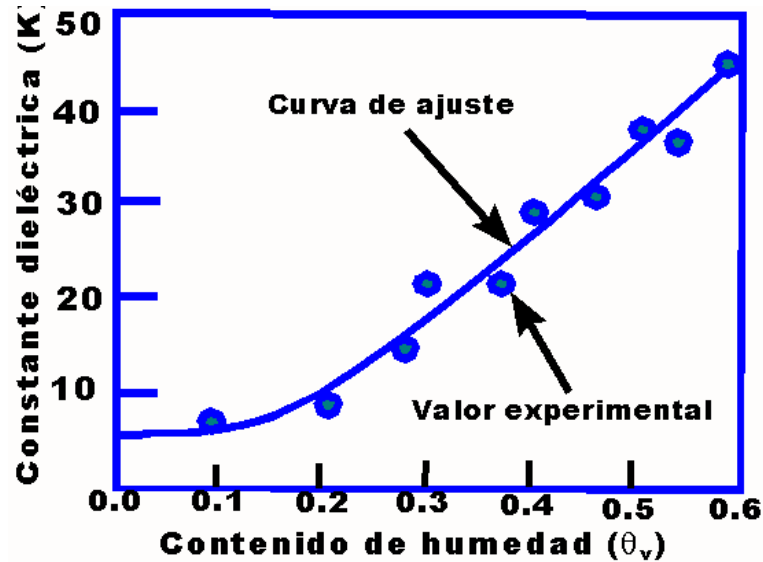


Figura 4.9 Relación típica entre constante dieléctrica y contenido de humedad volumétrico.

EL volumen de muestreo está dado aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$V = \pi(0.7S)^2 L \quad (4.13)$$

Donde S es el espaciamiento entre varillas extremas, L es la longitud de las varillas.

El principal problema con este método es la medición de tiempos de tránsito pequeños y la generación de pulsos abruptos. El tiempo de tránsito entre un contenido de humedad volumétrico de 0 a 100%, en una sonda con longitud menor a 30 cm, es de sólo 8 ns. Es por eso que se requiere un generador de pulsos de alta frecuencia y un osciloscopio de muestreo de alta frecuencia para poder medir tiempos pequeños. Tradicionalmente, el tiempo de tránsito es medido en la pantalla de un osciloscopio y el contenido de humedad volumétrico es calculado manualmente.

Entre las desventajas del TDR resalta la atenuación de la señal eléctrica debido a la presencia de iones en la solución del suelo. Para valores de conductividad eléctrica mayores a 1 dS m^{-1} del extracto de saturación se requieren varias curvas de calibración para rangos de salinidad del agua. La señal usualmente es inestable para valores mayores de 5 dS m^{-1} . La energía electromagnética enviada a través de las sondas (varillas) sirve para reorientar o polarizar las moléculas del agua. Si otras fuerzas actúan sobre las moléculas de agua, como las producidas por la materia orgánica y arcillas, es menos factible que la fuerza electromagnética aplicada polarice las moléculas de agua. Las curvas de calibración deben ser obtenidas bajo las condiciones del suelo que se quiere muestrear, esto es, similares contenidos de arcilla, materia orgánica y temperatura. Las varillas deben insertarse paralelas y evitar generar cavidades para reducir errores en las mediciones. El tipo de contacto entre las varillas y el suelo es de vital importancia en la propagación del pulso, cualquier grieta o hueco

restringe su propagación. La atenuación del pulso eléctrico debido a las sales del suelo puede ser usada para estimar la conductividad eléctrica del suelo (Dalton *et al.*, 1984).

Existen diferentes sensores tipo “TDR” en el mercado, entre los cuales destacan: TRASE, TRIME, Moisture Point, ThetaProbe, Aqua-Tel, y Hydra Soil Moisture Probe. La diferencia de estas diferentes sondas además de su precio es la configuración del sistema de medición en una o más componentes (las varillas, el generador de pulso y el medidor de tiempo de tránsito del pulso). Es posible colocar varias varillas (como las mostradas en la **Figura 4.8** en campo y medir manualmente la constante dieléctrica con la ayuda de un lector-generador portátil. Otras configuraciones incluyen todos los componentes en una sola unidad.

Existe otro método conocido como tipo “FDR” (Frequency Domain Reflectometry) que al igual del TDR se basa en el cambio de las propiedades de ondas eléctricas y magnéticas al pasar por un medio poroso bajo diferentes contenidos de humedad. Los sensores de frecuencia o capacitancia (FDR) consisten en dos electrodos, usualmente cilíndricos, inmersos en un material dieléctrico (que no conduce corriente eléctrica) que forman una sonda FDR. Para realizar mediciones en campo, se insertan la sonda FDR al suelo y con la ayuda de un osciloscopio se aplica a los electrodos una frecuencia de 50 a 150 Mhz , lo cual genera una frecuencia resonante. De manera similar a la sonda de neutrones, algunas sondas FRD pueden ser movibles por lo que requieren de tubos de acceso para bajar la sonda y muestrear a diferentes profundidades. La ventaja de estos sensores FDR es que se pueden dejar en campo para monitorear la humedad del suelo continuamente, sin embargo por su alto costo no se pueden tener varios puntos de muestreo. Es posible colocar varios electrodos a diferentes distancias sobre la sonda para muestrear automáticamente la humedad de diferentes profundidades instalando la sonda fija en el suelo. Al igual que el TDR las sondas FDR requieren de una curva de calibración. Existen varios sensores comerciales tipo FDR, entre los que destacan el Aquaterr, el enviroscan, y el sentry.

4.3.2 Estado energético del agua del suelo (h)

La combinación de sólidos, espacio poroso y agua que existe en el complejo suelo determina la energía con la que las partículas del suelo eléctricamente cargadas están reteniendo las moléculas de agua contenidas en el espacio acuoso, y que al ser absorbida por las plantas será ocupada por aire. Como el potencial mátrico del agua en el suelo está relacionado con la energía que una planta debe desarrollar para absorber la humedad del suelo. El movimiento de agua del suelo hacia la planta estará determinado por la diferencia de potenciales. La definición de un valor crítico del potencial mátrico (h_c) y su correspondiente contenido de humedad crítico (θ_c) ha permitido tener una mejor idea de cuándo regar basándose en el monitoreo del potencial energético del agua en el suelo conocido como potencial mátrico.

En los últimos años se han concentrado grandes esfuerzos para definir los valores críticos (h_c) para diferentes cultivos principalmente irrigados por goteo. El método consiste en colocar varios tensiómetros a varias profundidades (usualmente 15, 30 y 45 cm) y cuando los tensiómetros alcanzan un valor predefinido (h_c) se inicia el riego y se finaliza cuando alcanzan otro valor predefinido (h_{max}). El control de humedad usando tensiómetros puede servir para minimizar pérdidas por percolación

maximizando la absorción de agua por la planta. La ventaja del uso de tensiómetros es su relativo bajo costo, que permite al agricultor tener acceso a uno o varios tensiómetros dependiendo de la variabilidad de sus suelo, superficie o tipo de cultivo para darle seguimiento a la variación de temperatura (**Figura 4.10**).

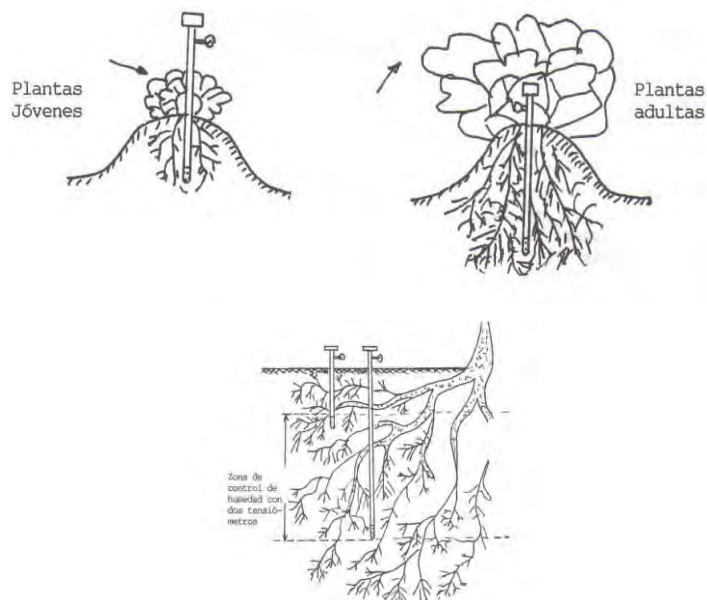


Figura 4.10 Posición relativa de los tensiómetros en función del cultivo

Aunque varios métodos han sido desarrollados para determinar el potencial mátrico del agua en el suelo, los dos métodos más comunes para medirlo son el tensiómetro y el psicrómetro.

La **Tabla 4.2** muestra los valores críticos del potencial mátrico reportados en la literatura, en centibares (1 bar = 100 centibares), a los cuales hay que regar para mantener a los cultivos sin estrés hídrico que pueda afectar el rendimiento.

Tabla 4.2 Valores mínimos de la tensión mátrica (h_c) del suelo sin problemas de salinidad para definir el momento del riego en varios cultivos.

Cultivo	h_c (centibares)	Cultivo	h_c (centibares)
Aguacate	40-50	Alfalfa	80-150
Apio	20-30	Brócoli (inicial)	45-55
Brócoli (final)	60-70	Cebolla seca	55-65
Cebolla verde	45-65	Cítricos	50-70
Col	60-80	Coliflor	60-70
Fresa	20-30	Frutos caducifolios	50-80
Lechuga	40-60	Limón	40
Maíz elotero	50-100	Melón	35-50
Naranja	20-100	Papa	30-50
Pepino	100-300	Soya	50-150

Cultivo	h_c (centibares)	Cultivo	h_c (centibares)
Sorgo	60-130	Tomate	60-100
Vid	40-100	Zanahoria	55-65

Tensiómetros

Un tensiómetro es una cápsula de cerámica enterrada en el suelo en un extremo y conectada a un sensor de presión (vacuómetro) en otro extremo por medio de una columna de agua. Un tensiómetro debe estar cerrado herméticamente para evitar la entrada de aire y operar apropiadamente. Los tensiómetros miden la fuerza con que el agua está retenida en el suelo, la cual es un indicador del esfuerzo que deben realizar las raíces de la planta para extraer la humedad del suelo. Las longitudes comerciales de los tensiómetros varían de 15 centímetros a casi dos metros (**Figura 4.11**).

Un tensiómetro es hace referencia a la tensión con que el agua está adherida a las partículas del suelo y por tanto es un métodos usados para indicar, en forma relativa, si en el suelo existe suficiente humedad disponible para el crecimiento de las plantas. Los cambios que ocurren en el espesor de la capa de agua que rodea las partículas del suelo alteran la tensión del agua en el mismo. Estos cambios se expresan en fluctuaciones de tensión de la humedad en el suelo. En la práctica, el tensiómetro mide los rangos de humedad de suelo bajo los cuales las raíces de las plantas absorben activamente agua. Estrictamente los tensiómetros no definen cuánta agua hay en el suelo, pero indican cuándo aplicar el riego basándose en la energía de retención del agua en el suelo. Para estimar la humedad del suelo a partir de lecturas de los tensiómetros se requieren de tablas (**Tabla 3.9**) o curvas (**Figura 3.9**) que relacionan el potencial mátrico con la humedad del suelo, tal como se presentaron en el **Capítulo 3**. Una forma más precisa es obtener directamente la curva característica del suelo en laboratorio o campo.

El agua en la cápsula porosa del tensiómetro se mueve (dentro y fuera de la cápsula) respondiendo a los cambios en el estado energético del suelo que rodea a la cápsula hasta que alcanza un estado de equilibrio. A medida que el suelo se seca, el agua del tensiómetro es liberada en el suelo formándose una cámara de vacío en la parte superior de la columna de agua tal como lo muestra la **Figura 4.13A**. Es posible colocar un traductor de presión para medir electrónicamente la presión de la cámara de vacío del tensiómetro por medio de un microprocesador o *datalogger*¹.

¹ La palabra Datalogger (del idioma inglés) es a veces traducida al castellano como “Registrador de Datos Analógico” o también como “Adquisidor de Datos”

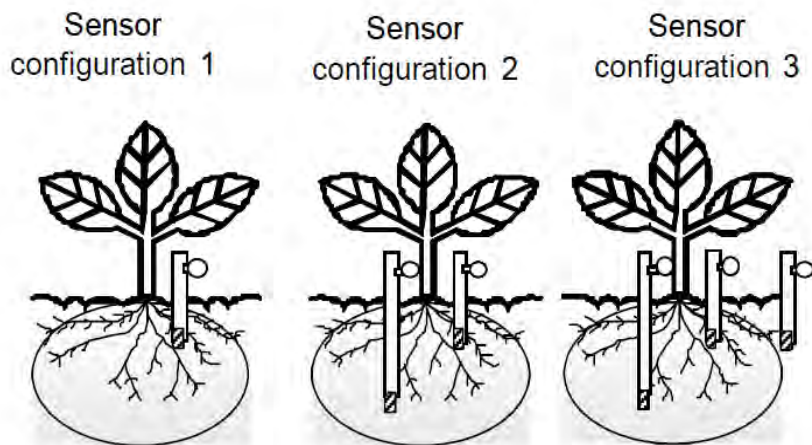


Figura 4.11 Representación esquemática posiciones recomendadas de colocar tensiómetros

La variabilidad espacial del suelo es quien define el rango de acción de un tensiómetro, el seguimiento puede ser manual, si cada periodo de tiempo hay que revisar el movimiento de la aguja, o puede ser dotado de un dispositivo eléctrico generalmente, que pueda “monitorear” automáticamente dicho movimiento y más aun que llegado a un valor específico preestablecido, emita una señal (un sonido, encender una luz, etc.) y con ello se pueda iniciar el riego. Actualmente existen en el mercado tensiómetros dotados de un dispositivo como el que se menciona, con lo cual en grandes superficies es una opción importante para automatizar el riego, aunque siempre será importante verificar periódicamente que los datos registrados estén siendo usados de manera adecuada.

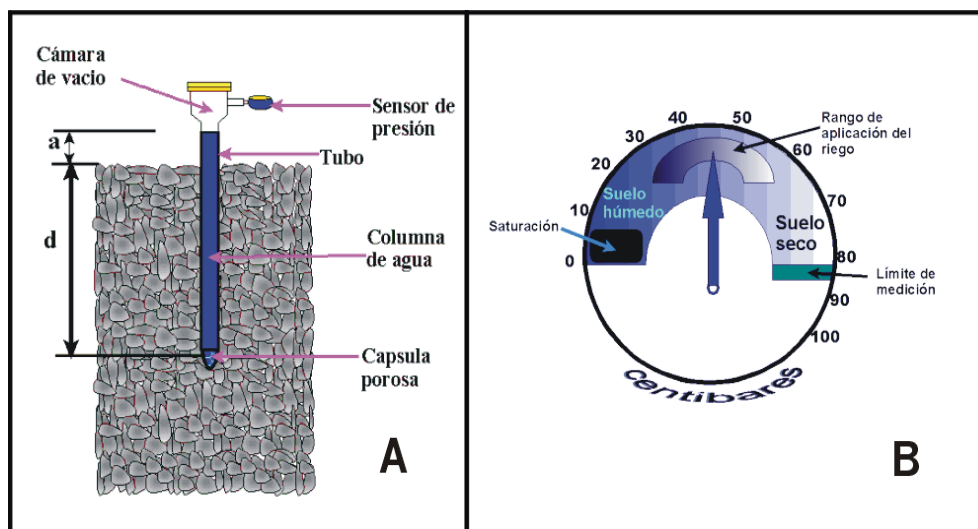


Figura 4.12 Componentes de un tensiómetro instalado en campo (A) y escala de valores del potencial mátrico en centibares (B).

El potencial mátrico del agua del suelo en contacto con la cápsula porosa (h) está dado por:

$$h = p - a - d \quad (4.14)$$

Donde p es la succión medida en el vacuómetro expresada en longitud de columna de agua, a y d son alturas o longitud de columnas de agua definidas en la **Figura 4.13A**.

El uso de los tensiómetros requiere mantener la columna de agua a una altura definida ($a + d$) o conocer sus valores para tener mediciones correctas sobre todo en el rango húmedo. Para altas tensiones con columnas de agua cortas, se puede ignorar la corrección de agua, i.e. $h = p$.

Ejemplo. Dada la **Figura 4.13A**, estimar la presión en el vacuómetro o traductor de presión si $a = 20$ cm, $d = 100$ cm, y el potencial mátrico es de $h = -200$ cm.

$$P = h + d + a = -200 + 20 + 100 = -80 \text{ cm}$$

La **Tabla 4.3** muestra las equivalencias entre las unidades más usuales de expresar el potencial del agua en el suelo.

Tabla 4.3 Equivalencias de unidades de presión y lámina (psi se refiere a libras por pulgada cuadrada).

Unidad	Equivalencia
1 bar	100 kPa = 10^5 Pa = 0.1 MPa
1 bar	100 cbar = 1000 mbar
1 bar	1022 cm de agua
1 atm	1035 cm de agua = 101.325 kPa
1 kPa	1 J kg ⁻¹ = 1000 Pa
1 bar	14.503773 psi = 33.504 ft
1 bar	1 kg cm ⁻²
1 bar	100 Centibares (cbar)
1 mm de agua aplicada en una hectárea	10 m ³ = 10,000 ℓ

Ejemplo: Si el tensiómetro mide 30 centibares, calcular su equivalencia en bares, kPa, cm de columna de agua, kg cm⁻², y libra pulgada⁻² (psi):

$$30 \text{ cbar} = 0.3 \text{ bar} = 30 \text{ kPa} = 306.4 \text{ cm agua} = 0.3 \text{ kg cm}^{-2} = 4.35 \text{ psi.}$$

Un valor menor a 0.1 bar indica condiciones de saturación. Una limitación severa de los tensiómetros es su estrecho rango de operación (0 a 85 centibares), por arriba de los 80 centibares (cb) el aire empieza a entrar por la cápsula porosa, rompiéndose el estado de equilibrio entre el agua del suelo y la del tensiómetro. La **Figura 4.13 (B)** muestra la escala de valores típicos de un vacuómetro o manómetro de un tensiómetro.

El valor máximo de trabajo de un tensiómetro varía con la altitud, a 1000 msnm el valor máximo es de 60 cb y de 80 - 85 al nivel del mar. En la mayoría de los suelos agrícolas, más del 50% del agua absorbida por las plantas está en ese rango de tensiones, porcentaje que puede ser mayor al 75% para suelos arenosos. Esta limitación de los tensiómetros se presenta en suelos arcillosos donde 85 cb indicarían un suelo húmedo con más del 50% de la humedad aprovechable por lo tanto si se tiene un factor de abatimiento hídrico mayor del 50%, el tensiómetro dejaría de funcionar cuando todavía no es el momento del riego. Sin embargo, con sistemas de riego por goteo donde la frecuencia de riego es usualmente menor de tres días los tensiómetros funcionan ya que para la mayoría de los suelos agrícolas se tienen tensiones menores a 80 cb. Los tensiómetros son muy usados en cultivos de alta sensibilidad al estrés hídrico como la papa y la fresa ya que se deben mantener altos niveles de humedad.

Los tensiómetros generalmente se colocan en batería a varias profundidades y distancias de la raíz, con el fin de conocer el estado energético hídrico de la zona radical y el sentido del flujo del agua en el suelo. Es una práctica común colocar un tensiómetro en la zona de máxima actividad radical (entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ de la profundidad radical) y otro abajo de ésta, como un indicador de la percolación profunda o riego deficiente. Aunque el número de estaciones tensiométricas (batería de tensiómetros a diferentes profundidades) por hectárea depende de la variabilidad del suelo, al menos una estación por cada 5 ha es recomendable tener instalado en campo.

La **Figura 4.14** describe los cambios típicos de la tensión que se observan en las lecturas de dos tensiómetros instalados a dos profundidades (45 y 90 cm) después y antes de aplicar el riego. El tensiómetro superficial (45 cm) muestra mayor variación ya que se localiza en la zona de mayor extracción de agua por las raíces. La localización de los tensiómetros en sistemas por microirrigación debe considerar la profundidad radical y la posición de los emisores. Los cambios de tensión a mayor profundidad (90 cm) son menos pronunciados con un desfaseamiento para alcanzar los valores máximos después de un riego o lluvia. La ocurrencia de grandes variaciones en el tensiómetro profundo indicaría pérdidas de agua por percolación profunda.

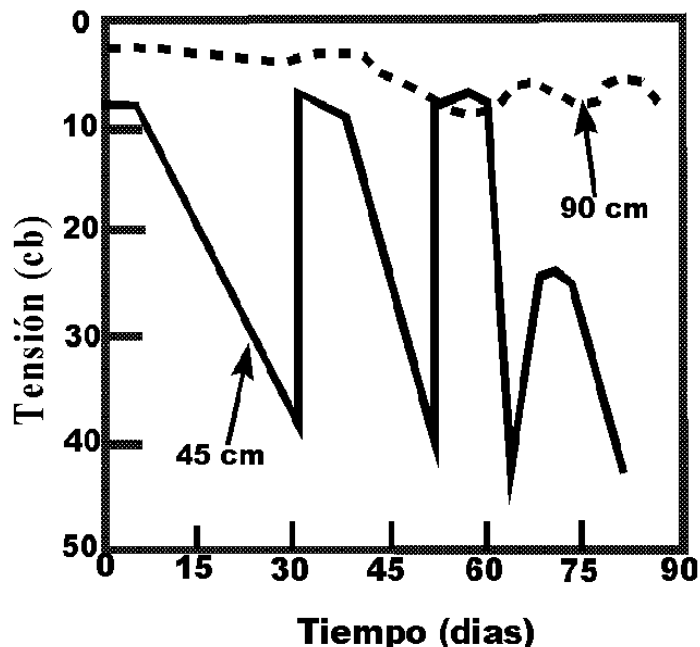


Figura 4.13 Variación de la tensión del agua en el suelo a dos profundidades: 45 y 90 cm bajo un buen manejo del riego.

La frecuencia de lectura de los tensiómetros depende del sistema de riego utilizado. En riego localizado es conveniente realizarlo con mucha frecuencia, posiblemente diario por la mañana.

En la instalación de tensiómetros se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ✓ Los tensiómetros deben ser llenados con agua destilada o deionizada. Se puede adicionar al agua algún fungicida o bactericida para evitar el taponamiento de la cápsula porosa por limos biológicos.
- ✓ Nunca se debe exponer la cápsula al medio ambiente ya que los solutos en solución pueden precipitarse y sellarla.
- ✓ La cápsula debe sumergirse en agua durante varios días para saturarla. El agua fluye de la cápsula porosa sólo si esta se encuentra saturada. Si la cápsula se seca, el aire penetra y el flujo de agua disminuye o cesa. Se puede aplicar una succión para acelerar la saturación.
- ✓ Debe excavarse un pozo de instalación usando una barrena con un diámetro igual al de la cápsula porosa del tensiómetro. Nunca usar herramientas que compacten el suelo. En suelos sueltos se genera un buen contacto al insertar directamente el tensiómetro empujándolo en el suelo.
- ✓ Se debe asegurar un buen contacto entre la cápsula y el suelo para lo cual se puede utilizar arena sílica fina o parte del suelo excavado, humedeciéndola y colocándola en el fondo del pozo. Un tensiómetro puede operar deficiente en suelos arenosos debido a un pobre contacto hidráulico entre la cápsula y las partículas del suelo.

- ✓ La superficie del suelo próxima a la columna del tensiómetro se debe compactar para evitar que el agua penetre por las paredes del tensiómetro.
- ✓ Se llena la columna totalmente y se cierra herméticamente. Se recomienda succionar el aire del tensiómetro con una bomba de vacío para remover el aire atrapado en la columna de agua.
- ✓ El tensiómetro debe ser purgado para remover cualquier burbuja de aire acumulada en su cámara de vacío o cuando la tensión se rompe al secarse el suelo. Cuando el suelo se seca y las lecturas del tensiómetro son constantes indica que el tensiómetro ha dejado de trabajar, si el suelo continúa secándose la cápsula pierde la saturación con la consiguiente entrada de aire y la lectura de tensiómetro marca cero. Para que el tensiómetro vuelva a trabajar apropiadamente se requiere un incremento de la humedad del suelo, en caso contrario se vuelve a vaciar el tensiómetro.
- ✓ La parte superior del tensiómetro debe protegerse de posibles daños mecánicos o ambientales.
- ✓ Una vez instalado un tensiómetro se debe esperar al menos 24 hr para alcanzar equilibrio hidráulico.
- ✓ El tiempo de lectura debe ser cuando exista el menor flujo de humedad en el suelo, generalmente por la mañana.

Problemas de manejo

- ✓ Si se observan burbujas con lecturas (de tensión) baja ($h < 50$ cb), es probable que se deba a un contacto deficiente entre la cápsula porosa y el suelo.
- ✓ Si el sensor de presión marca condiciones de saturación cuando el suelo está seco, es posible que se haya roto el vacío en el tensiómetro debido a la entrada de aire por la cápsula, por lo cual el tensiómetro ha dejado de trabajar. Se debe abrir y rellenar de agua después del siguiente riego.
- ✓ Los tensiómetros superficiales responden rápidamente a los cambios de manejo superficiales (riego, evaporación, absorción de agua por raíces, etc.), mientras que los colocados a profundidades fuera de la zona radical tienen cambios menos drásticos.

Psicrómetro-termopar

Un psicrómetro-termopar puede ser usado para inferir el potencial de la solución del suelo usando la presión de vapor del aire que está en equilibrio con el agua en una muestra del suelo. Un psicrómetro para medir potenciales *in situ* básicamente consiste de una cápsula porosa que permite el paso del vapor de agua presente en el suelo, la presión de vapor dentro de la cámara de la cápsula porosa permanece en equilibrio con la del aire del suelo. Dentro de la cámara de la cápsula existe un termopar que al recibir una corriente eléctrica directa pequeña, la temperatura de la unión de los dos metales disimilares del termopar disminuye abajo de la temperatura del punto de rocío de la atmósfera. En ese punto el vapor de agua se condensa en la unión funcionando como un termómetro de bulbo húmedo. El enfriamiento es entonces discontinuado y la temperatura de la unión es medida con un voltímetro al tiempo que la unión es enfriada ya que las gotas condensadas en la unión se re-evaporan. La temperatura de la unión

depende de la velocidad de evaporación, la cual está relacionada con la humedad relativa presente en el suelo. El voltaje es entonces medido en la unión mientras el agua se está evaporando para posteriormente convertirlo a temperatura. En general los pasos para evaluar el potencial son leer el voltaje, convertirlo a temperatura, después a presión de vapor y por último a potencial usando tablas o ecuaciones derivadas de principios físicos.

Valores de humedad relativa comprendidos entre 1 y 0.9288 tienen asociado un rango correspondiente de potenciales que varían de 0 a 100 bares. La mayor restricción de los psicrómetros es la dificultad para medir pequeños cambios de temperatura asociados con la alta humedad relativa presente en suelos húmedos. Típicamente, los psicrómetros son primordialmente usados en suelos secos con potenciales menores de -5 bares.

Resistencias eléctricas en bloques porosos

Cuando un bloque poroso está en contacto con el suelo ambos se equilibran de manera que los cambios en las propiedades eléctricas o termales del bloque están en relación con el suelo que lo rodea. Esto es, el bloque adquiere un contenido de humedad similar al del suelo que lo rodea. El principio de medición se basa en que la cantidad de agua en el bloque puede ser estimada por la resistencia generada al paso de una corriente eléctrica entre dos electrodos insertados en el material poroso, usualmente hecho de yeso. La resistencia al flujo eléctrico está relacionada con el contenido de humedad. Al secarse el suelo, también del bloque se seca y la resistencia eléctrica del suelo se incrementa debido a que el área conduciendo la corriente eléctrica se reduce. Lo anterior es equivalente a usar un cable de diámetro cada vez más pequeño para conducir la corriente eléctrica entre dos electrodos. A mayor contenido de humedad, menor es la resistencia al paso de una corriente eléctrica. Los electrodos consisten de dos mallas formadas por una serie de alambres paralelos. Es posible generar curvas que relacionen la resistencia eléctrica del bloque con el contenido de humedad.

Una de las limitaciones más severas de la mayoría de los bloques porosos disponibles en el mercado es su sensibilidad a la temperatura del suelo y a la concentración de sales, agravándose en suelos sódicos, que pudieran formarse entre los dos electrodos, así como la disolución del material poroso sobre todo en suelos que permanecen húmedos por largos periodos de tiempo. Las lecturas de los bloques son distorsionadas en suelos con conductividades eléctricas del extracto de saturación mayores a 1.5 dS/m. La mayoría de los bloques están hechos de yeso, ya que el yeso amortigua el efecto de la salinidad en la resistencia o conductancia eléctrica.

La variabilidad en las condiciones del bloque dificulta la calibración de los mismos. A diferencia de los tensiómetros, los bloques porosos, funcionan mejor en el rango seco (mayor de 80 KPa), requieren poco mantenimiento pero su periodo de vida útil es más corto. El tiempo para alcanzar un equilibrio entre el bloque poroso y el suelo es mayor que entre el tensiómetro y el suelo. Algunos bloques comerciales están equipados con un sistema de ajuste por temperatura ya que la resistencia disminuye cuando la temperatura incrementa.

Los bloques son fáciles de instalar, mantener y manejar. Para instalar los bloques de yeso se requiere excavar un pozo de acceso a la profundidad requerida y colocar una pasta de suelo y agua (lodo) para que al colocar el bloque se genere un buen contacto entre el suelo y el bloque. Los suelos arenosos presentan un pobre contacto hidráulico con el bloque, por lo que la respuesta del bloque a los cambios de humedad es lenta. Antes de colocar el bloque en el campo se debe saturar por algunos minutos en un recipiente. Se rellena el pozo y se coloca una etiqueta al cable del bloque con la profundidad de instalación.

Algunos bloques porosos pueden ser equipados con una fuente de calor y varios sensores de temperatura para determinar la conductividad térmica del bloque, la cual está relacionada con el contenido de humedad. La ventaja de estos sensores térmicos es que no son afectados por la concentración de sales en solución.

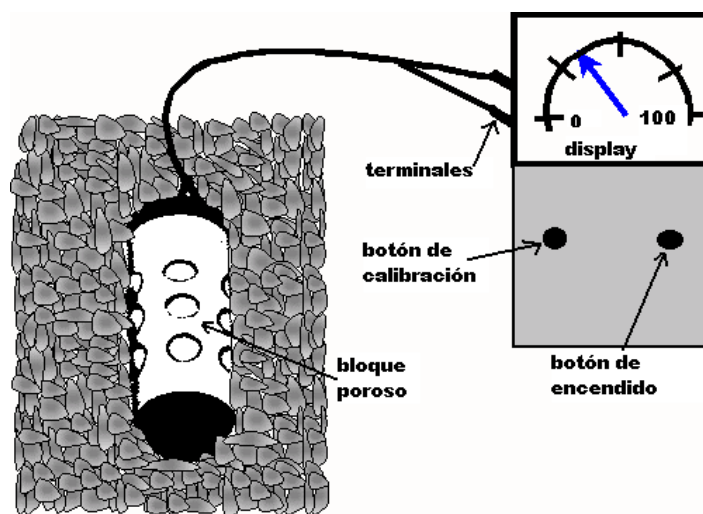


Figura 4.14 Bloque poroso con su medidor de resistencia eléctrica.

La **Figura 4.15** muestra el sensor tipo "Watermark" que tiene algunas ventajas sobre los bloques porosos tradicionales tales como el uso de material poroso granular de difícil disolución y el uso de una membrana sintética porosa para contener el material poroso y los electrodos. Usualmente los distribuidores de bloques también comercializan el instrumento para leer la resistencia cuyo costo promedio es del orden de los 300 dólares. No es conveniente usar un medidor de resistencia eléctrica comercial ya que éste funciona con corriente continua o directa (DC) en circunstancias que lo que se requiere aquí es corriente alterna (AC), puesto que al usar corriente directa o continua se corre el riesgo de polarizar los electrodos, resultando ello en lecturas inestables.

4.4. INDICADORES EVAPORATIVOS

En cultivos al aire libre, se dice que mientras la atmosfera esté dispuesta a recibir humedad, se mantendrá el cambio de estado de líquido a vapor conocido como evaporación si ocurre de una superficie libre o rugosa, y transpiración si esta proviene de los estomas de las hojas. Atendiendo este principios se han desarrollado

metodologías para su estimación, uno de los más utilizados es el tanque evaporímetro, pero además pueden ser útiles bulbos porosos, atmómetros para estimar indirectamente el consumo hídrico diario de las plantas, dichos dispositivos miden la evaporación en una superficie evaporante ya sea una superficie libre o una superficie porosa artificial. La evapotranspiración es estimada a partir de dos factores; el primero que depende de las características climáticas y el otro del cultivo, así al multiplicar los cambios en el volumen de agua del dispositivo evaporante por un coeficiente empírico calibrado localmente del cultivo es posible su estimación. Estos dispositivos tienen la desventaja de requerir una cuidadosa selección del sitio, mantenimiento y sobre todo una calibración para cada cultivo.

4.4.1 Tanque evaporímetro

Un tanque evaporímetro consiste en un depósito que almacena agua abierto a la atmósfera. La tasa evaporativa de un tanque puede ser calculada ajustándola en función del tamaño del tanque evaporativo. La **Figura 4.16** muestra que a medida que la humedad del aire disminuye, la variabilidad de la tasa evaporativa está en función del tamaño del tanque. Para permitir la comparación de resultados, se utiliza un tanque evaporímetro tipo A (**Figura 4.17**).

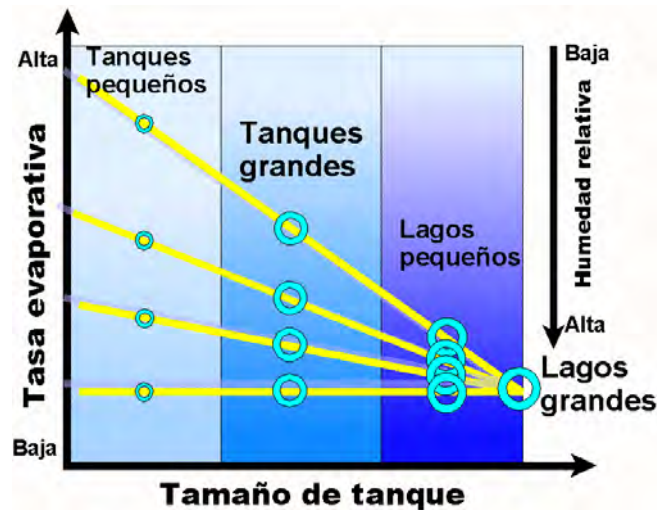


Figura 4.15 Variación de la tasa evaporativa en función del tamaño del tanque de medición (Adaptado de Ward, 1967).



Figura 4.16 Tanque evaporímetro tipo A.

Aunque la pérdida de agua de un tanque evaporímetro responde a las mismas variables atmosféricas que la de una superficie vegetal, existen varios factores que deben considerarse:

- La cobertura vegetal en el sentido del barlovento (de frente a la dirección del viento) con respecto al tanque define en gran medida las demandas evaporativas de la atmósfera. La evaporación del tanque será significativamente mayor si el viento dominante pasa por suelo desnudo que por pasto antes de llegar a la zona evaporante. En este sentido existen recomendaciones en cuanto a distancias mínimas despejadas en la proximidad del tanque.
- La altura del tanque, y las características vegetales en este reducido espacio, donde ocurren turbulencias que afectan el microclima alrededor del tanque y en consecuencia variaciones al proceso físico
- El albedo o coeficiente de reflexión de la superficie libre es menor (5 - 8%) que el correspondiente para los cultivos (20 - 25%), esto en consideración que una superficie más clara tiene un albedo mayor que una superficie más oscura, y por lo tanto el contenido de humedad en el suelo (y por tanto color) aporta variación en el proceso
- El alto calor específico de los cuerpos de agua permiten almacenar calor durante el día y ser liberado por convección en la noche, generando evaporación durante este periodo, cuando alrededor del 95% de la evapotranspiración de los cultivos se presenta durante el día.
- Las condiciones microclimáticas alrededor de las superficies vegetales, en términos de turbulencia, temperatura y humedad, difieren de la imperantes en la superficie libre.

4.4.2 Atmómetro

Un atmómetro es un recipiente cerrado donde la superficie evaporante no es una superficie libre sino una superficie porosa artificial que se encuentra siempre saturada. Los atmómetros ofrecen las siguientes ventajas sobre los tanques evaporímetros:

- Son más pequeños (generalmente de 15.2 cm de diámetro) y en consecuencia más fáciles de instalar, transportar y mantener.
- Su superficie (porosa) evaporante húmeda se asemeja a la resistencia difusiva y reflectiva de las hojas.
- Por sus dimensiones, responden rápidamente a las condiciones atmosféricas cambiantes.
- Mínimo flujo de calor de los lados del reservorio.
- Mínimo error debido a precipitaciones.

Sin embargo, una limitación fuerte es su alta sensibilidad al viento y a la energía radiante.

Ante estas observaciones es necesario seguir las recomendaciones de estandarización y calibración de los tanques evaporímetros y atmómetros. La evaporación se incrementa en un 10% si se pinta de negro un tanque evaporímetro galvanizado blanco.

4.4.3 Relación de Bowen

Este método estima la tasa evapotranspirativa real a partir del gradiente vertical de temperatura y vapor en el aire asumiendo condiciones estacionarias de flujo para los coeficientes de transferencia de vapor los cuales se asumen proporcionales a los de calor y momentum.

Considerado como un método simplificado, la relación de Bowen parte de la conservación de energía (balance energético) y consiste en estimar la densidad de flujo de calor latente, usando un gradiente de temperatura y humedad, acoplado con mediciones de la radiación neta y la densidad de flujo de calor del suelo.

Durante mucho tiempo se consolidó como el método estándar para estimar el flujo evaporativo en la atmósfera, sin embargo con el desarrollo de la correlación turbulenta, este presenta ventajas sensibles para su uso.

4.4.4 Correlación turbulenta

El método de la correlación turbulenta utiliza el principio de la relación de Bowen, considerando que la evaporación puede ser estimada en la forma de agua perdida por la superficie evaporante o lo que es lo mismo, en función de la ganancia de vapor por el ambiente.

El vapor de agua junto con el calor, bióxido de carbono y otras sustancias atmosféricas son transportadas verticalmente en corrientes de aire llamadas

turbulentas. Es un método combinatorio que se ha tomado como el estándar en trabajos experimentales, pero que debido al considerable costo del equipo que necesita, su aplicación ha sido limitada

La estimación de la evapotranspiración real con esta técnica se basa en la medición tanto del movimiento ascendente y descendente de las turbulencias como de sus concentraciones de vapor, para esto se asume que la atmósfera actúa como un sistema abierto en el que los cambios en el flujo de vapor de agua a través de una capa límite en la vecindad de la interfase cultivo-atmósfera proporciona un buen estimador de la evapotranspiración del cultivo.

Proporciona medidas directas del flujo de calor latente filtrándola de la difusividad, el perfil del viento y posibles fuerzas en movimientos ascendentes. Consiste en expresar la densidad del flujo como la varianza entre las fluctuaciones en la velocidad vertical y concentración de vapor en un periodo de tiempo establecido, generalmente de una fracción de segundo. El método requiere medir: la velocidad vertical del viento (anemómetros sónicos de alta precisión), las variaciones instantáneas de la temperatura y la densidad de vapor de agua usando termopares e girómetros analizadores de gases de alta precisión y rápida respuesta.

Sin embargo, en cultivos protegidos donde el vector del viento esta afectado por el tipo de ventilación podría afectar la estimación, no obstante seria interesante el comportamiento de los sensores bajo estas condiciones y tratar de establecer adecuaciones que permitan el uso de esta metodología en el calculo de la evapotranspiración en invernaderos, y tratar de competir con los costos de este método.

4.5 INDICADORES EVAPOTRANSPIRATIVOS

El objetivo del riego es reponer el agua que la planta ha perdido. El termino perdido, significa que ha “consumido” en sus procesos fisiológicos, que haya removido de su sistema vascular y finalmente liberado hacia la atmosfera, lo que comúnmente se llama evapotranspiración. Estimar el momento del riego está relacionado con medir la evapotranspiración de los cultivos. Los indicadores evapotranspirativos consisten en medir directamente la evapotranspiración en campo o laboratorio. Aunque esta tarea no es fácil por la gran cantidad de factores que involucra, existen varios dispositivos para medir con buena precisión la evapotranspiración, entre los que destacan los lisímetros en sus diferentes modalidades.

A nivel de laboratorio es posible estimar la ET mediante cámaras de evapotranspiración y medirla directamente. El procedimiento consiste en encerrar un área del cultivo en una cámara con paredes transparentes a la radiación y estimar la cantidad de agua transpirada de la plantas midiendo el flujo de aire y la concentración de vapor de agua saliendo y entrando a la cámara. Las desventajas de estas cámaras son que al restringir el intercambio de gases y calor, las condiciones dentro de la cámara no son representativas del ambiente externo donde se desarrollan los cultivos.

Otros dispositivos considerados experimentalmente exactos para el cálculo del consumo de agua por las plantas son los lisímetros. Son de hecho usados para calibrar otras maneras de medir la evapotranspiración, tanto modelos numéricos como sensores, ya que para determinar la evapotranspiración reproduce idealmente las condiciones del cultivo y suelo de interés (ver **Figura 4.18**). Un lisímetro es el medio más preciso para medir continuamente la transferencia de vapor de agua del suelo (evaporación) y las plantas (transpiración) a la atmósfera. En un lisímetro se trata de reproducir el ambiente de los cultivos en condiciones naturales aislando parte de la zona radical con un control de los procesos difíciles de medir para estimar con precisión los componentes de la ecuación de balance.

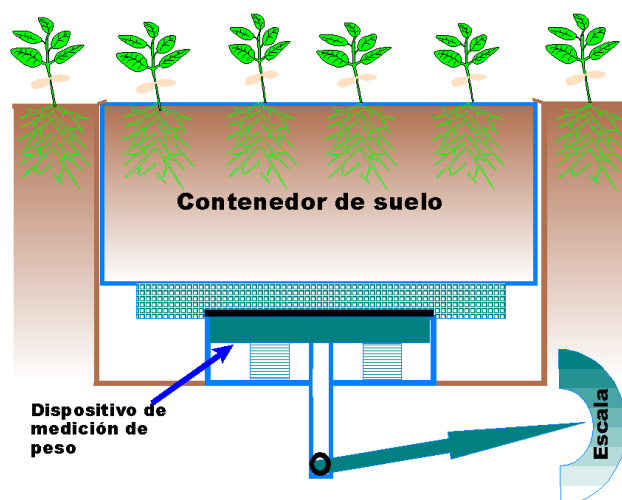


Figura 4.17 Representación simplificada de un lisímetro de pesada.

Es un depósito que está enterrado, de paredes verticales, abierto en la parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar. Obviamente debe desarrollarse vegetales cuya profundidad y desarrollo radicular no sean afectados por las dimensiones del mismo. Existen básicamente de dos tipos: de balance y de pesada, y la diferencia consiste en que el primero se elabora la "caja" y posteriormente se rellena con el material donde se desarrolla el cultivo, dejando una salida para cuantificar el volumen drenado.

El contenido del suelo es llevado a un nivel bien determinado, nivel del fondo del lisímetro, y el agua de drenaje recogida y medida. Las dimensiones son variables de acuerdo al objetivo del estudio, con valores de superficies que oscilan entre 1 y 10 m², con una profundidad de 1 m de suelo o más. El lisímetro de pesada, se construye en el lugar donde se lleva a cabo el experimento y solo se perforan las paredes y el piso donde se coloca la balanza para llevar el control del contenido de humedad en base al peso.

Es posible hacer la combinación de estos de acuerdo a las posibilidades y exigencias, un lisímetro de pesada es bastante caro de instalar, pero en cultivos de

invernadero donde se coloca el sustrato en la maceta, es posible colocar esta sobre una balanza de precisión y poder hacer la ecuación de balance por cada maceta (planta).

Con un lisímetro volumétrico, en un invernadero, como se muestra en la 9 es posible determinar la evapotranspiración del cultivo mediante la ecuación de balance, Lo que se mide es ETr si está cubierto de vegetación y Ev si el suelo está desnudo.

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = Tr + Ev$$

en la etapa inicial del cultivo sin embargo, una vez que el cultivo incrementa su follaje (IAF) la ecuación queda:

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = ETr$$

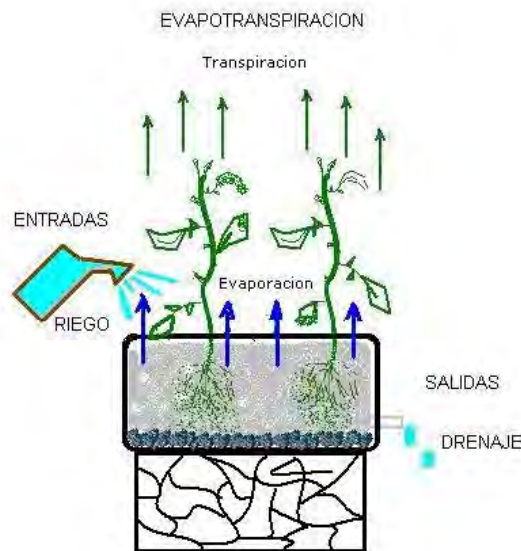


Figura 4.18 Esquema del lisímetro de balance

Los lisímetros son los únicos dispositivos que proporcionan una estimación directa del flujo de agua que se presentan en las superficies del suelo y vegetal, por lo que son usados intensamente para calibrar otros métodos.

Los lisímetros deben reunir los siguientes criterios:

1. Deben de construirse para mantener el mismo perfil de humedad bajo condiciones naturales.
2. Deben de manejarse de la misma manera que el área que se desea reproducir.
3. Deben de aislarse e instalarse con sumo cuidado para reproducir el suelo a estudiar.

4. Deben de extenderse por debajo de la zona radical o mantener la misma humedad en el límite inferior del suelo a estudiar.

Los lisímetros son indispensables para probar nuevas teorías o ecuaciones. La **Figura 4.20** muestra una comparación de datos promedios mensuales de evapotranspiración medidos con lisímetros reportados por Allen, *et al.*, (1998) contra los obtenidos con la ecuación de Penman-Monteith en once localidades alrededor del mundo.

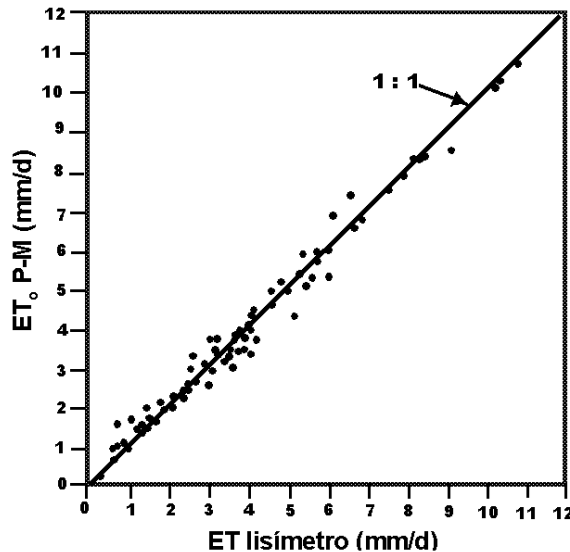


Figura 4.19 Valores promedio mensuales de la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de Penman-Monteith así como los valores correspondientes a lisímetros instalados en once localidades alrededor del mundo (Allen, *et al.*, 1998).

La **Figura 4.21A**, muestra la superficie de un lisímetro en el cual se pueden apreciar al fondo dos estaciones meteorológicas automatizadas. Los lisímetros constituyen una herramienta vital en el desarrollo y mejora de ecuaciones para estimar la evapotranspiración de referencia y los coeficientes de cultivo. En un lisímetro el cultivo es plantado en un tanque, ya sea con suelo alterado o inalterado, en el cual se puede cuantificar la pérdida del agua debida a evaporación del suelo o la transpiración de los cultivos. Los cambios evapotranspirativos son cuantificados ya sea por diferencia sucesiva entre pesos, volúmenes o alguna otra propiedad del lisímetro que permita estimarlos. Usualmente los lisímetros tienen un tubo de acceso en el centro para medir los cambios en el contenido de humedad usando la sonda de neutrones. En la base del lisímetro normalmente se tiene un sistema de drenaje que permite extraer y medir el agua drenada, en ocasiones el sistema de drenaje permite mantener un nivel freático y medir el agua requerida para mantener ese nivel en la base del lisímetro. La **Figura 4.21 B** muestra un lisímetro de pesada que consta de un sistema de pesas para medir los cambios de peso ocurridos del tanque lisimétrico.

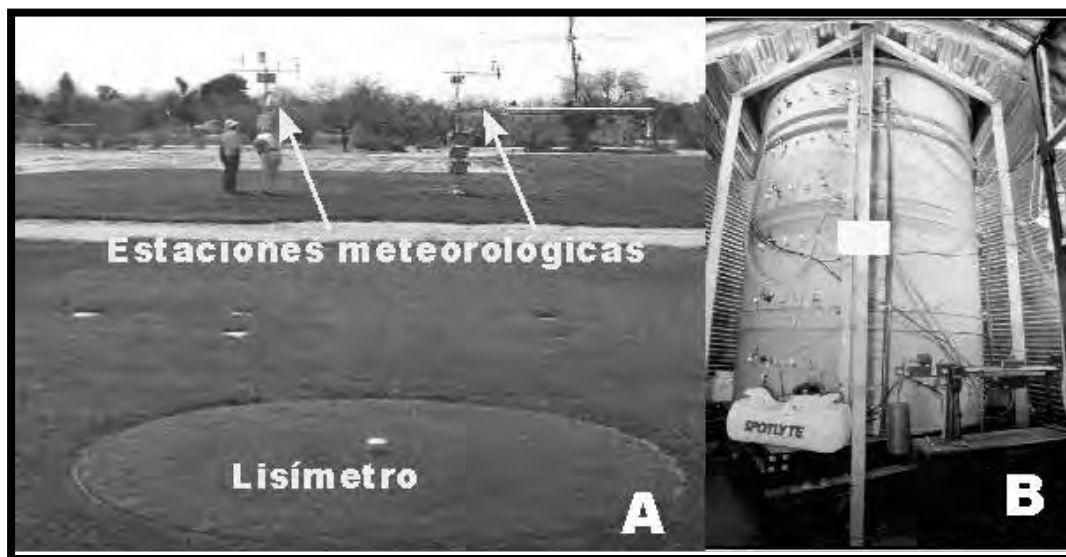


Figura 4.20 Lisímetro de pesada. **A)** Imagen de la superficie del suelo en la que se aprecian al fondo dos estaciones meteorológicas, **B)** imagen interior con detalles del sistema de monitoreo.

Usualmente los lisímetros están equipados con un sistema de medición, tal como se muestra en la **Figura 4.21B**, para estimar algunas variables del suelo en diferentes puntos de muestreo, las más importantes son: contenido de humedad usando TDR y sonda de neutrones, potencial mátrico usando tensiómetro, conductividad eléctrica usando TDR, calidad del agua usando tubos de succión para su análisis químico posterior. Desgraciadamente, por los altos costos de instalación y mantenimiento, el uso de lisímetros está restringido a labores de investigación. En la República Mexicana solamente se tienen tres lisímetros, en la Universidad Autónoma Chapingo, en el Colegio de Postgraduados y en el CENID-RASPA del INIFAP de Durango (Ver **Figura 4.22**)



Figura 4.21 Toma aérea del lisímetro de pesada instalado en el CENID-RASPA del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de La Laguna, México.

Existe el método de los medidores de flujo de savia para estimar la tasa transpirativa, estimando la tasa a la cual la savia pasa a través de los tubos vasculares. Existen varias técnicas para estimar el tiempo que toma a la savia moverse entre dos puntos de la planta. El método más usado en la actualidad es el del pulso de calor que consiste en instalar una serie de anillos de resistencias alrededor del tallo, los cuales suministran un pulso de calor. Para determinar si hay movimiento de savia, se colocan dos sensores de temperatura por arriba y abajo de las resistencias de generación de calor. Existe flujo de savia si los sensores de temperatura muestran un cambio. La **Figura 4.22** muestra medición de savia en dos ramas de un árbol. La **Figura 4.23** muestra dos acercamientos del medidor de flujo de savia y equipo de adquisición de datos.



Figura 4.22 Medidores de savia instalados en dos ramas de un árbol.

Comercialmente, los sensores de flujo de savia son una tecnología utilizada con éxito en la determinación de la transpiración de las plantas. La medición de esta, se basa en la analogía del flujo de la savia, en el sentido de que del 100 % del flujo de savia, el 99 % es agua. Estos sensores estiman indirectamente el flujo de savia por medio de un balance de energía de una sección del tallo, la cantidad de calor transportado por la savia está directamente relacionado al flujo de savia transportado por el floema, lo que se convierte en un flujo “casi” en tiempo real, expresado en masa/tiempo (Figura 4.22). La medición involucra el calentamiento continuo de una porción corta del tallo que es presentado a detalle por Sakuratani, 1981 y Baker and Van Bavel, 1987. A diferencia de otros métodos, estos sensores no requieren calibración puesto que el flujo de la savia queda determinado directamente por el balance de energía y las velocidades de convección calorífica por el flujo de la savia.

Se han constituido una manera importante, accesible y práctica de medir el consumo de agua por las plantas, lo cual en agricultura es de suma importancia económica y ecológica. Consecuentemente en la horticultura, en la producción de plantas en invernaderos, viveros o ambientes controlados puede medirse con la misma facilidad.

Algunas Características son:

- Medición directa de transpiración
- Sensor de tipo trampa de collar
- Núcleo interno flexible que se adecua a la forma del tallo
- Balance de energía calorífica constante
- Registro y monitoreo en tiempo real

Beneficios:

- No requiere ninguna calibración
- Reutilizable y portátil (muy manual)
- No dañino, se adecua al tamaño de la planta
- Mide flujo másico absoluto



Figura 4.23 Sensor de flujo de savia para estimar la evapotranspiración del cultivo

Teoría del balance de energía en el tallo

El sensor usa dos termocoples espaciados simétricamente a 0.75 cm aproximadamente por medio del cual se le aplica la fuente de calor (Q_h), este es equivalente a la entrada de la fuente de poder (P_{in}).

Los componentes a partir de los cuales se generan las ecuaciones para llevar a cabo el balance de energía se aprecian en la **Figura 4.24**. El balance de energía es expresado con la siguiente ecuación:

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_f \quad (W) \quad (4.15)$$

donde

P_{in} es la entrada de calor por medio de una pila o corriente eléctrica (V), la cual se puede asociar con la ley de Ohm, que indica:

$$P_{in} = \frac{\frac{\text{VoltajeEnt rada}}{\text{atenuador}}}{\text{resistencia}} = \frac{V_{in}^2}{R} \quad (4.16)$$

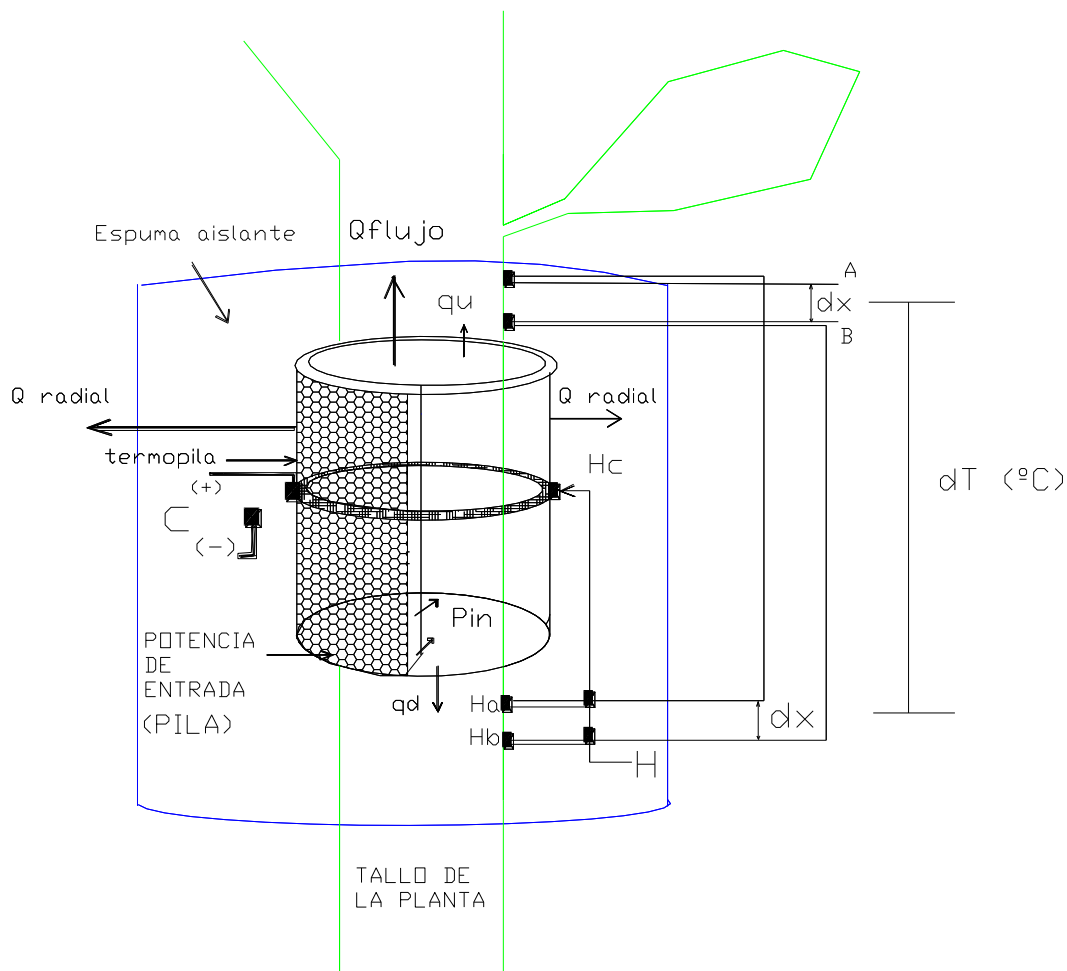


Figura 4.24 Esquema que muestra las variables para el cálculo del flujo de savia.

Qr es el flujo de calor radial conducido, expresado como:

$$Q_r = K_{sh} * C * H \quad (4.17)$$

aquí

K_{sh} es la constante de conductividad térmica en la cubierta y está dado en $\left(\frac{W}{mV}\right)$, este es un término difícil de evaluar, en este caso para su determinación se aplica la ecuación 4.16, haciendo $Q_F=0$ como sigue:

$$P_{in} = Q_r + Q_v \quad (4.18)$$

Y

$$Ksh(CH) = Pin - Qv \quad (4.19)$$

Por lo tanto después de computar Pin y Qv se resuelve:

$$Ksh = \frac{(Pin - Qv)}{CH} \quad \frac{W}{mV} \quad (4.20)$$

CH es el dato que arrojará el sensor conectado en el puerto C del Data Logger, y se refiere al voltaje de calor radiante de la termopila (mV).

Qv es el flujo de calor axial o vertical conducido por medio del tallo, tiene dos componentes relacionados por las leyes de Fourier, se puede establecer la siguiente relación:

$$Qv = Qu + Qd \quad (4.21)$$

Donde

$$Qu = Kst * A * \frac{dT_u}{dX} \quad (4.22)$$

Análogamente

$$Qd = Kst * A * \frac{dT_d}{dX} \quad (2.23)$$

donde

Kst es la conductividad térmica del tallo $\left(\frac{W}{m * K} \right)$

A es el área de la sección del tallo en m²

$\frac{dT_d}{dX}$ es el gradiente de temperatura según la dirección del flujo (d (own), hacia abajo y

u (p) hacia arriba, ambos $\left(\frac{C}{m} \right)$; y

dX es el espaciamiento de la unión en el termopar (m).

Existen dos alambres diferentes en los termocoples que están llevando a cabo la medición de la temperatura de la savia. El canal AH mide la diferencia de temperatura

A-Ha (mV). El canal BH mide la diferencia en temperatura B-Hb (mV). Por sustracción de estas dos señales queda:

$$BH - AH = (B - Hb) - (A - Ha) = (B - A) + (Ha - hB) \quad (\text{mV}) \quad (2.24)$$

El resultado proporciona las dos componentes de la conducción del flujo de calor axial fuera del diámetro del tallo. Los componentes del Q_v son combinados con un común denominador resultando una ecuación desglosada:

$$Q_v = K_{st} * A * \frac{BH - AH}{dX} * 0.04 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \quad (2.25)$$

El factor 0.04 mV/C convierte la señal diferencial del termocople a grados centígrados, el valor de K_{st} , adopta tres valores: 0.042 W/m. K para tallos grandes, 0.54 para herbáceos y 0.28 para tallos huecos.

y finalmente:

Q_f es el calor convectivo acarreado por la savia, en nuestro caso la incógnita.

Los datos que se recolectan son las conexiones de los termocoples conectados en tres canales (AH, BH Y CH) y la potencia de entrada (P_{in}), con lo cual se llega al cálculo del flujo. Después de dividir por el calor específico del agua y el incremento de la temperatura de la savia, el flujo calorífico es convertido directamente a tasa de flujo de masa.

Después de resolver la ecuación 4.16 para Q_f , la tasa de flujo por unidad de tiempo es calculada desde la ecuación para el flujo de savia como lo describe Sakuratani, 1981 y Baker- Van Babel, 1987. Esta ecuación lleva el residual del balance de energía (Watts), y lo convierte en tasa de flujo dividida por el incremento de temperatura de la savia, de la capacidad de calor del agua.

Este razonamiento es de acuerdo al hecho de que la savia contiene 99 % de agua y esto permite asumir que la capacidad calorífica, C_p , es constante en el tallo. Con lo cual se establece la relación de que 1 Watt equivale a 1 joule/segundo, con lo cual puede ser convertido a tasa de flujo (g/s), y por lo tanto cuantificar este incremento.

Con este sistema de ecuaciones se llega a la expresión que interesa:

$$Q_F = P_{in} - q_v - q_U - Q_d \quad (2.26)$$

La partición del flujo de calor por conducción radial (Q_r) y vertical (Q_v) es estimada del calor generado (P_i) por una termopila y a través de dos termocoples que

miden la temperatura en dos posiciones del tallo (ΔT), El flujo convectivo (Q_f) es estimado del residuo de la ecuación de balance de energía en la zona de muestreo del tallo. El flujo de calor transportado por la savia es convertido a flujo masa al dividir Q_f por la capacidad de calor del agua y por el incremento de temperatura debido al flujo de savia.

$$F = \frac{Q_f}{C_p \cdot dT} \quad (2.27)$$

La estimación de los flujos: radial y vertical, requiere de un estimador de la conductividad térmica de la planta ($0.54 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) bajo estudio y una buen aislamiento de la fuente de calor del exterior. En ausencia de flujo de savia, la conductividad del substrato (K_{sh}) relaciona directamente el flujo de calor radial con el calor generado por la termopila cuando Q_f es nulo, en horas de la madrugada o durante días lluviosos.

$$F = \frac{Pin - Q_v - Q_r}{C_p \cdot dT} \quad (2.28)$$

donde

C_p es el calor específico del agua ($4.186 \text{ J/g }^\circ\text{C}$) y dT es el incremento de la temperatura de la savia. ($^\circ\text{C}$), y puede ser relacionado con la siguiente expresión:

$$dT = \frac{(AH - BH / 2)}{0.040} \frac{mV}{mV/^\circ C} \quad ^\circ\text{C} \quad (2.29)$$

Este incremento (dT), es medido en mV promediando las señales de AH y Bh, y es convertido a grados centígrados ($^\circ\text{C}$) al dividir por la constante de conversión de temperatura del termocople, como se aprecia en la Ec. 2.29.

4.6 BALANCE DE HUMEDAD

La estimación de las entradas y salidas de agua de la zona de raíces puede ser integrada en ecuaciones que permiten estimar el contenido de humedad del suelo diario u horario. En el **Capítulo 6** se presenta con más detalle cómo puede utilizarse este método para calendarizar el riego.

4.7 SITIOS DE MUESTREO

Siendo el sistema agua-suelo-planta-atmósfera altamente heterogéneo en espacio y tiempo, uno de los problemas que se presentan cuando se instalan sensores para medir un indicador de riego en campo es el de elegir el sitio correcto. El mejor sitio de muestreo está asociado con las condiciones representativas promedio de las zonas de raíces desde el punto de vista de estrés hídrico, sin embargo, cuando el valor del indicador de riego en esta zona reporte un valor crítico, algunas partes del cultivo ya pueden haber mostrado síntomas de estrés hídrico, por lo que el mejor sitio debe ser la zona más crítica del terreno de acuerdo a las siguientes recomendaciones:

- Zonas con deficiente aplicación o penetración de agua.
- Zonas con drenaje rápido y poco almacenamiento.
- Zonas con el menor contenido de humedad.
- Zonas con mayor representatividad en términos de tipo, variedad y fase fenológica del cultivo.
- Zonas sin problemas de acceso, lectura y protección del equipo de medición.
- Zonas donde el indicador responda de manera rápida y precisa a las condiciones de estrés de la planta.

En sistema de riego por microirrigación, la localización de sensores de humedad depende de los siguientes factores:

- Espaciamiento y gastos de emisores.
- Salinidad del suelo.
- Distribución radical del cultivo.
- Propiedades hidrodinámicas del suelo.

El muestreo del contenido de humedad bajo riego de alta frecuencia es complicado ya que los cambios de humedad son pequeños y no fácilmente detectables por los sensores de humedad debido a su baja resolución. En otras ocasiones, la localización del punto de muestreo se complica ante la alta variabilidad del contenido de humedad que depende de las propiedades hidrodinámicas del suelo, de la distancia al emisor y de la localización en la zona radical. Ante este problema, se requieren mayores puntos de muestreo en función de la distancia del emisor y en diferentes localidades de la zona radical.

Actualmente no existe un indicador de riego usado comercialmente para calendarizar el riego en grandes zonas de riego ya que algunos son tediosos y caros para implantarlos en campo, otros son puntuales y sujetos a una alta variabilidad en el indicador. La mayoría son subjetivos, dejando la responsabilidad a la persona que toma la decisión de regar.

4.8 EJEMPLOS

Ejemplo 4.8.1 Calcular el índice de estrés hídrico de cultivo de papa si la temperatura del aire es de 20°C y la temperatura del cultivo es de 18°C. Asumir un valor de $\Delta T_1 = 4^\circ\text{C}$.

i. $(T_c)_m = 18^\circ\text{C}$ y $(T_a)_m = 20^\circ\text{C}$

ii. $\Delta T_m = (T_c)_m - (T_a)_m = 18 - 20 = -2^\circ\text{C}$

iii. Obtener el déficit de presión de vapor (ΔP) para la temperatura del aire al tiempo de medición.

$$e_s = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)} = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27(20)}{20+237.3}\right)} = 2.34 \text{ KPa}$$

$$e_a = e_s \frac{HR}{100} = 2.34 \frac{40}{100} = 0.936 \text{ KPa}$$

$$DPV = e_s - e_a = 2.34 - 0.936 = 1.404 \text{ KPa}$$

iv. Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo no estresado, ΔT_0

$$\Delta T_0 = \alpha_1 - \alpha_2 \Delta P = 1.17 - 1.83(1.404) = -1.4$$

La **Tabla 4.1** Presenta los parámetros de la curva base para estrés nulo (α_1 y α_2) para papa.

v. Estimar el valor de ΔT_1 para un cultivo completamente estresado. Se asume que:

$$\Delta T_1 = 4^\circ\text{C}.$$

vi. Calcular el IEHC.

$$IEHC = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} = \frac{-2 - (-2.744)}{4 - (-2.744)} = 0.11$$

Ejemplo 4.8.2 estimar el contenido de humedad volumétrico usando la relación de Topp, *et al.*(1990) para los siguientes valores de la constante dieléctrica (K): 3.24, 9.61, 10.89, 13.69 y 14.44.

Usando la siguiente relación:

$\theta(K) = -0.053 + 0.0292K - 5.5(10^{-4})K^2 + 4.3(10^{-6})K^3$, se obtiene los siguientes resultados.

K	3.24	9.61	10.89	13.69	14.44
θ_v (cm ³ cm ⁻³)	0.036	0.1806	0.2053	0.2547	0.2669

*“Se respira el cambio de fronteras de la humedad al viento, del viento a las raíces”
Pablo Neruda*

Evapotranspiración

5

CAPITULO 5

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Waldo Ojeda Bustamante y Agustín Ruiz García

5.1 INTRODUCCIÓN

Las plantas consumen grandes volúmenes de agua, por cada kilogramo de producto agrícola se requieren varios cientos de kilogramos de agua. Por ejemplo, se requieren alrededor 100 kilogramos de agua para producir un kilogramo de azúcar. Para producir 10 toneladas de maíz que representan el rendimiento promedio por hectárea en algunas regiones de México, se requieren 6,000 m³ de agua que corresponden a una lámina de 600 mm distribuido a lo largo del ciclo fisiológico del cultivo y al final se tienen 2 m³ de agua en 10 ton de maíz con una humedad del grano del 20%. En muy pocos lugares de México es posible obtener esa cantidad en forma de lluvia, a excepción de los meses de verano que es cuando se concentran las lluvias en la mayor parte del territorio mexicano. Una planta de maíz transpira 1.25 litros de agua a la atmósfera en sus etapas fenológicas iniciales, que pueden incrementarse hasta 14 litros en la etapa de máxima demanda.

El porcentaje de agua en una planta fisiológicamente activa varía del 60 al 95%. Su función es diversa y fundamental en los siguientes procesos: fotosíntesis, transporte de minerales y fotosintatos, soporte estructural, y crecimiento.

Los tallos de la planta cuentan con pequeños conductos (xilema) que se dividen en múltiples conductos en las ramas y hojas para finalizar en pequeñas aperturas llamadas estomas. De igual manera en la parte inferior, el xilema se ramifica en múltiples conductos que forman el sistema radical de la planta. El agua absorbida por las raíces es transportada por el xilema a toda la planta, una pequeña porción del orden del 1% es retenida en los tejidos vegetales: la mayoría (99%) es transpirada o liberada a la atmósfera por medio de los estomas. El uso consuntivo de un cultivo considera el agua evapotranspirada hacia la atmósfera y aquella que permanece almacenada en las plantas de dicho cultivo.

Aunque también existe la transpiración cuticular, la transpiración estomática es la más importante. Cerca del 90% del agua transpirada y la mayoría del bióxido de carbono pasa por los estomas. La apertura y cierre de los estomas lo controlan dos células oclusivas o guardas que al llenarse de agua se vuelven rígidas y turgentes, provocando que la cavidad estomática se abra. Al deshidratarse las células oclusivas, éstas colapsan y la cavidad se cierra, impidiendo el intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera. Cuando el agua está fluyendo por las hojas se crea una presión mayor que la atmosférica en las células de las hojas, a este estado se le conoce como

turgencia de la hoja. Durante la noche prácticamente la transpiración es nula, sin embargo, la absorción de agua por las raíces puede continuar a una tasa reducida que puede generar una presión positiva en la hoja y forzar la liberación de agua por la hoja en forma líquida, a este fenómeno se le conoce como gutación.

Las plantas se dividen en tres grandes grupos dependiendo del método de utilizar el bióxido de carbono: C3, C4 y CAM. Las plantas C3, por ejemplo la soya, tienen la menor eficiencia en el uso del agua debido a que tienen menor resistencia estomatal que las plantas C4, por ejemplo el sorgo. El metabolismo de las plantas CAM incrementa la eficiencia en el uso del agua debido a que abren sus estomas por la noche cuando el gradiente del vapor de presión entre el medio ambiente y las hojas es menor.

El número de estomas depende del tipo de cultivo, una hoja de maíz contiene de alrededor 7,000 estomas por cm^2 . Un árbol de vid tiene del orden de 30,000 estomas por cm^2 en su área foliar. Usualmente se presentan más estomas en el envés que en el haz de la hoja. La papa presenta más de tres veces de densidad estomática en el envés que en el haz de la hoja.

Aunque la mayor parte del agua se pierde por transpiración, su deficiencia tiene graves consecuencias en el crecimiento, rendimiento y susceptibilidad de los cultivos a enfermedades y daño por insectos. La transpiración es causada por la interacción del aire ambiental generalmente seco (con un déficit de vapor) y la superficie saturada de la hoja. Hillel (1991) hace una analogía del proceso transpirativo con el funcionamiento de una lámpara de petróleo. La mecha (hoja) que es abastecida de petróleo a través de un cordón (raíz) sumergido en petróleo (agua). Este abastecimiento debe ser continuo mientras la flama esté activa bajo la influencia de las fuerzas físicas impuestas en ambos extremos del cordón. La evaporación depende de la disponibilidad tanto de agua como de energía.

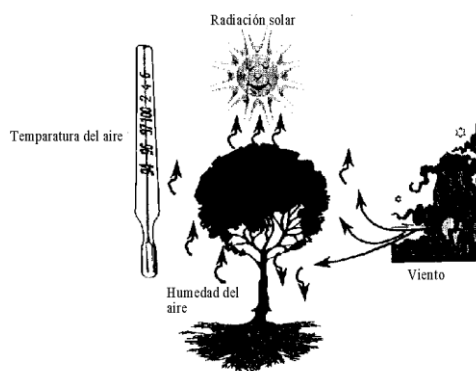


Figura 5.1 Componentes meteorológicos relacionados con la evapotranspiración.

Los procesos de evaporación y transpiración son afectados por los cambios que experimentan las distintas variables atmosféricas. La **Figura 5.1** muestra los cuatro componentes meteorológicos que determinan la evapotranspiración de un cultivo: radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Ambos procesos, evaporación del suelo y transpiración de las plantas, son conocidos

colectivamente como evapotranspiración. Ambos están relacionados con el cambio de fase del agua de líquido a vapor. La distinción es que en la transpiración el agua es evaporada de las superficies de las hojas después de haber sido transportada de las raíces, mientras que en la evaporación el agua acumulada en la parte superior del perfil del suelo es liberada directamente a la atmósfera en la forma de vapor de agua. Dichos procesos, evaporación y transpiración, son procesos físicos muy similares que difieren por el tipo superficie evaporante.

Los principales factores que controlan la evapotranspiración son los siguientes:

- Energía solar.
- Albedo.
- Capacidad de almacenamiento energético del suelo.
- Energía advectiva.
- Déficit de presión de vapor.
- Velocidad del viento.
- Interceptación energética.
- Tipo de superficie vegetal.
- Disponibilidad de Agua.
- Propiedades hidrodinámicas del suelo.

Existe una marcada variación horaria entre los procesos que constituyen la evapotranspiración. La **Figura 5.2** muestra la variación de la evaporación del suelo y la transpiración para un periodo de 24 hrs sin un evento de riego.

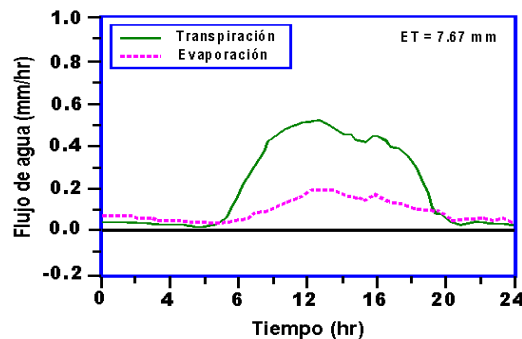


Figura 5.2 Variación horaria de la evaporación del suelo y transpiración sin la presencia de un evento de riego (Thompson, *et al.*, 1996).

Es difícil separar los procesos de transpiración y evaporación ya que se presentan de manera simultánea. Al inicio del ciclo la evaporación constituye el principal componente de la evapotranspiración, sin embargo, a medida que se desarrolla el cultivo y aumenta el área foliar, la transpiración pasa a ser el principal proceso de pérdida de agua de un cultivo como se muestra en la **Figura 5.3** cuando el índice de área foliar alcanza su valor máximo, el proceso transpirativo alcanza su valor máximo.

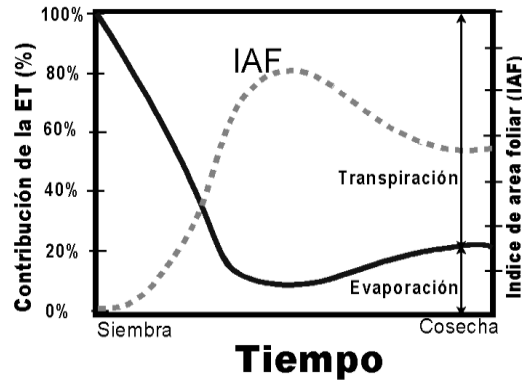


Figura 5.3 La variación de los componentes de la evapotranspiración durante el ciclo fenológico de un cultivo (Allen *et al.*, 1998).

La evapotranspiración es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y de vital importancia en la planeación y operación de zonas de riego, principalmente en aquellas donde los recursos hidráulicos son escasos y, muchas veces, inciertos. Alrededor de las dos terceras partes del agua precipitada sobre la superficie terrestre retorna a la atmósfera por medio de la evapotranspiración. El tercio restante, en tanto, escurre o percola. La **Figura 5.4** muestra una versión detallada del ciclo hidrológico a nivel fitósfera.

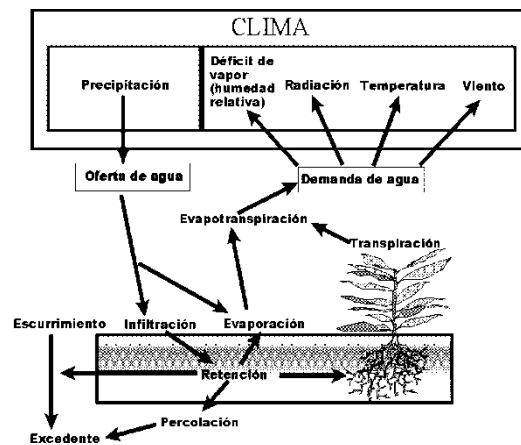


Figura 5.4 Balance hídrico a nivel fitósfera.

Se requiere energía para cambiar el estado energético de las moléculas de agua para pasar del estado líquido a vapor. Una de las principales variables que determinan la evapotranspiración (ET) es la radiación solar. La radiación solar proporciona la energía para calentar el agua líquida hasta que eventualmente se evapore. Obviamente la radiación solar es más intensa al mediodía y nula en la noche. La transferencia de calor de la atmósfera al suelo es otra variable relacionada con la radiación. Dicha transferencia es mayor cuando la temperatura del aire es mayor que la del suelo.

El viento es otra variable de importancia en la transferencia de vapor atmosférico, es un agente de remoción del vapor húmedo alrededor de las hojas, cambiándolo por aire seco. Existe una capa de aire saturado alrededor de las hojas, cuyo espesor, conocido como capa límite, depende de las características transpirativas de las hojas. La frontera de la capa límite se encuentra donde la humedad del aire se iguala a la humedad atmosférica. A mayor velocidad del viento menor es el espesor de la capa límite. En ausencia del viento el vapor de agua se acumularía y eventualmente saturaría una espesa capa de aire que se encuentra en la vecindad de las hojas con la consiguiente reducción de la tasa evapotranspirativa. Entre menor sea la capa límite, mayor es la transpiración de la superficie foliar adyacente. Durante un día sin condiciones extremas, los vientos son usualmente ligeros o prácticamente inexistentes en las primeras horas del día, se incrementan durante la tarde y se reducen en la noche.

Otra variable meteorológica relacionada con la evapotranspiración es la humedad del aire. El aire seco tiene mayor capacidad para absorber y transportar vapor de agua que un aire húmedo a la misma temperatura; en consecuencia, un aire seco produce un incremento de la ET. En ausencia de un frente húmedo, la humedad del aire es normalmente baja durante el día y alta durante la noche.

La transpiración se ha visto como un mal necesario. Las plantas requieren de la entrada de bióxido de carbono a través de las estomas para generar fotosintatos. El cierre de estomas está asociado con la falta de agua en la zona de raíces y a la alta demanda evaporativa de la atmósfera en las hojas. Como lo han comprobado diversas investigaciones en campo y laboratorio, existe una relación directa entre la transpiración y el rendimiento de un cultivo. Los estomas de la mayoría de las plantas se abren durante el día y se cierran durante la noche. La piña es una particular excepción ya que su sentido de apertura es inverso, los estomas se abren por la noche. La transpiración funciona como refrescante de la planta, por lo que el cierre de estomas trae consigo el calentamiento de las hojas por la radiación solar y, en consecuencia, un incremento de la respiración que se traduce en una reducción de los fotosintatos producidos.

Por cuestiones prácticas, la evapotranspiración es expresada como una lámina de agua que se transfiere a la atmósfera y se expresa usualmente en milímetros (mm) para un intervalo de tiempo fijo, generalmente un día, aunque puede ser una semana, un mes o un ciclo agrícola. De esta manera, si un cultivo tiene una evapotranspiración de 400 mm, durante su ciclo fenológico, en una zona agrícola con una precipitación efectiva de 150 mm, se requiere suministrar 250 mm mediante riegos para satisfacer sus requerimientos hídricos faltantes. Una tasa evapotranspirativa de 10 mm d^{-1} en una hectárea es equivalente a un volumen $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, a un suministro continuo durante 24 hrs de 1.16 l s^{-1} , y a un flujo energético total de 24,500 MJ.

Aunque la tasa evapotranspirativa está asociada en gran parte con las condiciones meteorológicas, alrededor de las hojas existen otros factores del suelo y cultivo que la controlan. La tasa evapotranspirativa depende de tres factores principales: la demanda evaporativa de la atmósfera, las condiciones edáficas

(capacidad transmitiva, retención y almacenamiento del agua, humedad actual) y de las características de la cubierta vegetal. Existe un desfase entre el flujo transpirativo que deja la hoja y el flujo que entra por la hoja, debido a la resistencia al flujo al pasar por los multiconductos de la planta. Durante el día, el máximo flujo transpirativo se presenta primero que el máximo flujo absorbente radical. Lo anterior ocasiona un marchitamiento temporal en las horas de mayor transpiración. La **Figura 5.5** describe el proceso para el cálculo de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r). Iniciando con datos ambientales de la interrelación planta-atmósfera para obtener la evapotranspiración de referencia (ET_o), posteriormente se ajusta de acuerdo con las características del cultivo en condiciones estándares obteniendo la evapotranspiración del cultivo en estas condiciones (ET_c), la cual es finalmente ajustada considerando las condiciones del suelo y las prácticas de manejo para obtener la evapotranspiración real.

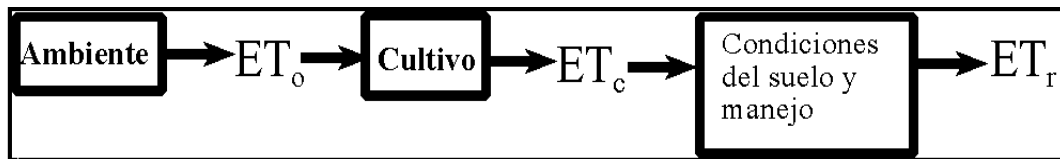


Figura 5.5 Pasos requeridos para estimar la evapotranspiración real de un cultivo.

5.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

El concepto de evapotranspiración potencial (ET_p) fue propuesto independientemente en 1948 tanto por Thornthwaite como por Penman, para expresar la evapotranspiración de una superficie continuamente húmeda, que tiene como única limitante la energía disponible.

Para dar mayor validez y precisión a las estimaciones de ET, fue necesario usar el concepto de evapotranspiración de referencia, ET_o , en lugar del de evapotranspiración potencial. Muchos autores toman ambos conceptos como sinónimos. Sin embargo, en la actualidad se prefiere usar el término de evapotranspiración potencial para referirse a la evapotranspiración máxima posible de un cultivo bajo condiciones óptimas de humedad y sanidad.

5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

La estimación periódica de la ET en una zona de riego constituye la base de la calendarización del riego para los diferentes cultivos presentes. Como es difícil generar una metodología para estimar directamente la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) es necesario estimar primeramente la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_o). Al asumir un cultivo definido bajo condiciones óptimas de humedad, el concepto de evapotranspiración de referencia permite aislar las demandas evapotranspirativas de la atmósfera de otros factores como prácticas de manejo, tipo y fase de cultivo.

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), usualmente pasto o alfalfa, que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar directamente a través de estimaciones directas de los cambios en peso de un tanque lisimétrico.

Es posible transformar los resultados de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia (alfalfa y pasto) usando un factor de escalamiento. La **Figura 5.6** compara la evapotranspiración en dos cultivos de referencia (alfalfa y pasto) estimados a partir de una ecuación tipo Penman cuyos parámetros fueron calculados con datos de lisímetros, con pasto y alfalfa, de varias localidades alrededor del mundo. La evapotranspiración del pasto representa del 76% al 100% del consumido por la alfalfa, con un promedio del 83% tal como se presenta en la **Figura 5.6** (Wright, 1996).

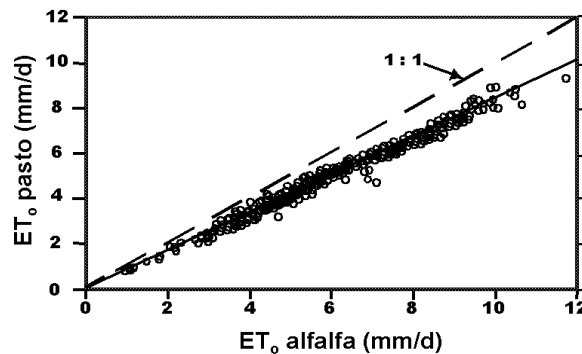


Figura 5.6 Comparación de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia: pasto y alfalfa (Wright, 1996).

La ET_0 según la FAO es la tasa evapotranspirativa de una superficie con una cobertura completa de un cultivo hipotético sin limitaciones de agua con una altura de 12 cm, una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 que se asemeja a cobertura de pasto con una altura uniforme. El pasto perenne ballico (rye grass) es la variedad más comúnmente usada como cultivo de referencia en estudios lisimétricos.

Shuttleworth (1993) definió la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0) como la tasa de evapotranspiración de un pasto idealizado con una altura fija de 12 cm, un albedo de 0.23 y una resistencia superficial de 69 s m^{-1} , mientras que Allen *et al.* (1998), asumen una resistencia de 70 s m^{-1} que corresponde a una superficie de suelo semiseca producto de una frecuencia de riego semanal.

Para la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), el cultivo de referencia es alfalfa con una altura entre 30 y 45 cm.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) puede determinarse mediante mediciones directas en lisímetros, pero dado su alto costo de instalación y operación, y aunado con las dificultades en la reproducción natural de las condiciones reales del cultivo, la estimación indirecta de la ET_0 basada en ecuaciones semiempíricas y empíricas seguirá siendo el principal medio de estimación. Por muchos años el método de Thornthwaite fue usado para estimar la ET_0 . Sin embargo, actualmente se cuestiona su validez en climas templados, ya que puede subestimar los valores reales hasta en

un 50%. La **Tabla 5.1** muestra valores típicos de la ET_o para diferentes regiones agroclimáticas.

Tabla 5.1 Evapotranspiración de referencia ET_o en mm d-1 para diferentes regiones agroclimáticas (adaptado de Allen et al., 1998).

Regiones	Temperatura media anual (°C)		
	< 10°C	20 °C	> 30°C
	Fría	Moderada	Caliente
TROPICALES			
Húmedas	2-4	3-5	5-7
Subhúmedas	3-5	5-6	7-8
Semiáridas	4-5	6-7	8-9
Áridas	4-5	7-8	7-10
SUBTROPICALES (lluvias en verano)			
Húmedas	2-3	3-5	5-6
Subhúmedas	3-5	5-6	6-7
Semiáridas	4-5	6-7	7-8
Áridas	4-5	6-8	7-9
SUBTROPICALES (lluvias en invierno)			
Húmedas-subhúmedas	2-3	4-5	5-6
Semiáridas	3-4	5-6	7-8
Áridas	3-4	6-7	7-9
TEMPLADAS			
Húmedas y semihúmedas	1-2	2-4	4-7
Semiáridas y áridas	1-3	4-7	6-9

La **Figura 5.7** muestra la variación diaria de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en el Valle del Carrizo, Sinaloa, México, estimada usando la ecuación de Penman-Monteith a partir de datos meteorológicos colectados por una estación agrometeorológica automatizada para los años de 1995 a 1998. También indica variaciones diarias de alrededor 2 mm en los años analizados, lo cual podría incrementarse hasta en 4 mm, si se considera una eficiencia global (conducción y aplicación) del 50% en la zona de riego (desde la fuente de suministro hasta la parcela) para los meses de demanda máxima (bajo cobertura total), en los cuales ET_r es muy cercana a ET_o .

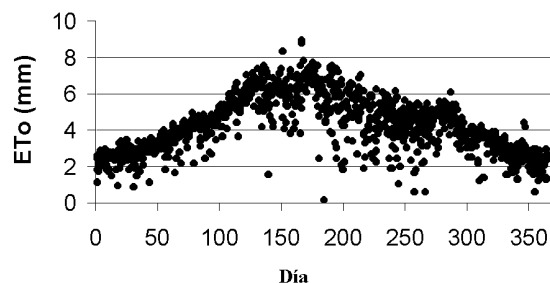


Figura 5.7 Variación de la evapotranspiración de referencia (ETo) en el Valle del Carrizo (1995-1998).

5.3.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia

No se debe confundir la evapotranspiración estimada con la evapotranspiración medida. Solamente los lisímetros y los métodos micrometeorológicos como el método de la correlación turbulenta proporcionan medidas muy aproximadas de la evapotranspiración real del cultivo, mientras que los demás sólo proporcionan una estimación de la evapotranspiración de referencia. Existen diferentes métodos para estimar la evapotranspiración indirectamente usando ecuaciones aproximadas que manipulan valores de las variables meteorológicas en la interfase cultivo-atmósfera.

Existe una diversidad de métodos para estimar la evapotranspiración de referencia con diferentes requerimientos de datos y grado de precisión. Algunos requieren datos mensuales, otros diarios, horarios y los más precisos del orden del segundo. Para unos se requieren de mediciones de las cuatro variables meteorológicas (humedad y temperatura ambiental, radiación solar y velocidad del viento) relacionadas con la evapotranspiración mientras que para otros sólo se requiere de alguna combinación de las cuatro variables. Los métodos fundamentados en principios físicos resultan particularmente interesantes, puesto que son aplicables a localidades diferentes de aquellas en las que han sido generados y calibrados, en contraposición con los métodos empíricos cuya validez se restringe a aquellas localidades en las cuales han sido calibrados.

Los métodos para estimar ET pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos:

- ✓ Aerodinámicos.
- ✓ Balance energético.
- ✓ Combinatorios.
- ✓ Semiempíricos.
- ✓ Empíricos.

Los métodos aerodinámicos se basan en las leyes de transferencia de calor y masa. Los de balance energético se basan en principios físicos de conservación de masa y energía. Los combinatorios son una mezcla de los aerodinámicos y de balance energético. Los métodos semiempíricos parten de principios físicos para obtener una ecuación base, sin embargo la estimación de la mayor parte de sus parámetros se realiza por la técnica de regresión. Por último, existen los métodos empíricos basados

en ecuaciones totalmente empíricas, en que los parámetros se obtienen por la técnica de regresión y no se fundamentan en principios físicos.

A continuación se presentan los principales métodos para estimar la evapotranspiración de referencia:

5.3.2 Correlación turbulenta (Eddy correlation)

La evaporación puede ser estimada en la forma de agua perdida por la superficie evaporante o como ganancia de vapor en el ambiente. El vapor de agua junto con el calor, bióxido de carbono (CO₂) y otras sustancias atmosféricas son transportadas verticalmente en corrientes de aire llamadas turbulencias o “eddies”. La estimación de la evapotranspiración real con la técnica de la correlación turbulenta se basa en la medición tanto del movimiento ascendente y descendente de las turbulencias como de sus concentraciones de vapor. Se asume que la atmosfera es un sistema abierto, por lo que los cambios en el flujo de vapor de agua a través de una capa límite en la vecindad de la interfase cultivo-atmósfera proporciona un buen estimador de la evapotranspiración del cultivo.

El método de la correlación turbulenta es un método combinatorio que se ha tomado como el estándar en trabajos experimentales, sin embargo, su aplicación generalizada es limitada por el alto costo de los equipos que requiere. Proporciona medidas directas del flujo calor latente, sin ninguna suposición en la difusividad turbulenta, el perfil del viento o en la influencia de las fuerzas de movimientos ascendentes. Consiste en expresar la densidad del flujo como la varianza entre las fluctuaciones en la velocidad vertical y concentración de vapor en un periodo de tiempo definido, usualmente del orden de una fracción de segundo. Las mediciones de la velocidad del viento, la humedad y la temperatura pueden presentar alta fluctuación temporal por lo que los sensores deben responder de manera instantánea. Se requiere estimar las distribuciones de los movimientos responsables de la transferencia vertical del vapor de agua para medir los flujos de calor sensible y de calor latente. El método requiere medir: la velocidad vertical del viento (comúnmente usando anemómetros sónicos de alta precisión), las variaciones instantáneas de la temperatura y la densidad de vapor de agua usando termopares e higrómetros analizadores de gases de alta precisión y respuesta rápida.

5.3.3 Relación de Bowen

Existe un método simplificado que estima la tasa evapotranspirativa real a partir del gradiente vertical de temperatura y vapor en el aire asumiendo condiciones estacionarias de flujo para los coeficientes de transferencia de vapor los cuales se asumen proporcionales a los de calor y momentum. El método conocido como “relación de Bowen” parte de la conservación de energía (balance energético) y consiste en estimar la densidad del flujo de calor latente, usando un gradiente de temperatura y humedad, acoplado con mediciones de la radiación neta y la densidad del flujo de calor del suelo. El método de Bowen había sido considerado como el método estándar para estimar el flujo evaporativo en la atmósfera, hasta que la correlación turbulenta mostró su superioridad.

5.3.4 Ecuaciones semiempíricas

En los últimos 50 años, se han desarrollado una gran variedad de métodos semiempíricos para estimar la evapotranspiración en diferentes condiciones climáticas. El problema de las fórmulas empíricas es su extrapolación fuera de las zonas para las que fueron generadas. Su uso resulta restringido puesto que dichas fórmulas requieren de una rigurosa calibración local y tienen poca utilidad global. Por ejemplo: el Método de Blaney-Criddle desarrollado para la zona oeste árida de los Estados Unidos se comporta adecuadamente allí; sin embargo, no es recomendable utilizarlo en zonas cuyas condiciones meteorológicas diarias son altamente variables, por ejemplo en zonas húmedas, las cuales no son bien representadas por valores semanales o mensuales.

Otro de los métodos empíricos que ha sido usado extensivamente para calendarizar el riego en tiempo real principalmente en riego por goteo, es el método del tanque evaporímetro, basado en la medición de la evaporación de un tanque estandarizado que proporciona información integral, concentrando en un solo valor los efectos combinados de las variables meteorológicas (radiación, viento, insolación, déficit de presión de vapor, etc.).

La **Tabla 5.2** presenta los cuatro métodos adoptados en el manual 24 de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977), para estimar la evapotranspiración de acuerdo a la disponibilidad de los datos climáticos y que fueron recomendados por expertos consultores en evapotranspiración. La FAO recomendó el método de Penman con modificaciones para ajustar las variables locales de los métodos de Blaney y Criddle, Makkink (radiación) y tanque evaporímetro USWB clase A, métodos que se discuten a continuación.

Tabla 5.2 Datos meteorológicos requeridos por los métodos de evapotranspiración recomendados por la FAO de acuerdo a la disponibilidad climática (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Método	Temperatura	Humedad	Velocidad de viento	Radiación solar	Evapora - ción
FAO Blaney Criddle	⊗	○	○	○	
FAO Radiación	⊗	○	○	⊗	
FAO Penman-Montieth	⊗	⊗	⊗	⊗	
Tanque evaporímetro		○	○	○	⊗

Dato esencial medible: ⊗

Estimación requerida: ○

El método de Penman-FAO es una adaptación del método presentado por Penman en 1948, con una nueva función del viento, derivada de datos obtenidos con lisímetros distribuidos alrededor del mundo. En respuesta a la recomendación de varios expertos la FAO ha adoptado la versión de Penman-Montieth como el estándar para estimar la evapotranspiración de referencia (Smith *et al.*, 1996, Allen *et al.*, 1998).

El método de la radiación es prácticamente el método de Makkink, desarrollado para Holanda, con la adición de un factor de corrección para adaptarlo a condiciones variables de humedad y viento. Su validez ha sido extendida a zonas con una amplia gama de condiciones climáticas. En general el método de la radiación muestra buenos

resultados en zonas húmedas donde el componente aerodinámico (viento) es relativamente pequeño, sin embargo su comportamiento es errático y subestima la evapotranspiración bajo condiciones áridas.

EL Método de Blaney-Criddle fue adaptado por la FAO a una amplia variedad de condiciones climáticas, introduciendo un factor de corrección dependiente de las condiciones de humedad, viento y nubosidad.

El método del tanque evaporímetro ha sido adaptado por la FAO definiendo un factor del tanque que depende de las condiciones climáticas del lugar y del tipo de entorno vegetal que rodea al tanque. La limitación más severa del método del tanque es su susceptibilidad a las condiciones microclimáticas de operación del tanque.

En estudios realizados por Jensen *et al.* (1990) se analizaron la precisión de 20 métodos para estimar ET_0 al compararlos con datos lisimétricos de 11 sitios con condiciones climáticas contrastantes. Los resultados, resumidos en la **Tabla 5.3**, muestran una amplia variación bajo dos grandes tipos climáticos, siendo el método de Penman-Monteith el de mejor aproximación a lo medido en lisímetros. Estudios realizados por otros investigadores, bajo condiciones áridas y húmedas, han confirmado lo anterior (Choisnel *et al.*, 1992).

La ecuación de Penman y sus diferentes variantes ha sido mostrada en diferentes estudios de varias partes del mundo como la de mayor precisión, la diferencia es menor del 15% de la ET_0 medida. Dicha ecuación combina dos términos, el relacionado con la radiación solar y el aerodinámico (viento y déficit de saturación), que permiten expresar de una mejor manera las variaciones de la ET en el ámbito local. Sin embargo las ecuaciones tipo Penman tienen la desventaja de requerir varios datos meteorológicos (ver **Tabla 5.2**), que muchas veces no se encuentran disponibles en la mayoría de las regiones agrícolas. Otra dificultad menor, es la complejidad de los cálculos involucrados.

La FAO recomienda usar el método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998). La ventaja del método de Penman-Monteith son las siguientes:

- Modelo físicamente basado.
- Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo.
- Incorpora parámetros aerodinámicos.
- Probado intensamente en varias localidades alrededor del mundo.
- Buena aproximación para estimar la evapotranspiración de referencia para pasto.

Tabla 5.3 Comparación de varios métodos para estimar la evapotranspiración de referencia tomando como referencia datos de 11 lisímetros alrededor del mundo (Jensen et al., 1990).

Zona	Húmeda			Árida		
	Indicador de Comparación	Rango #	Error %	Error estándar	Rango #	Error %
Métodos Combinatorios						
Penman-Montieth	1	+4	0.32	1	-1	0.49
FAO-24 Penman (c=1)	14	+29	0.93	6	+12	0.69
FAO-24 Penman (corregido)	19	+35	1.14	10	+18	1.1
FAO-PPP-17 Penman	4	+16	0.67	5	+6	0.68
Penman (1963)	3	+14	0.60	7	-2	0.7
Penman 1963, VPD #3	6	+20	0.69	4	+6	0.67
1972 Kimberley-Penman	8	+18	0.71	8	+6	0.73
1982 Kimberley-Penman	7	+10	0.69	2	+3	0.54
Businger-van Bavel	16	+32	1.03	11	+11	1.12
Métodos radiactivos						
Priestley Taylor	5	-3	0.68	19	-27	1.89
FAO-Radiación	11	+22	0.79	3	+6	0.62
Métodos de temperatura						
Jensen-Haise	12	-18	0.84	12	-12	1.13
Hargreaves	10	+25	0.79	13	-9	1.17
Turc	2	+5	0.56	18	-26	1.88
SCS Blaney-Criddle	15	+17	1.01	15	-16	1.29
FAO Blaney-Criddle	9	+16	0.79	9	0	0.76
Thornwaite	13	-4	0.86	20	-37	2.4
Métodos del tanque evaporímetro						
Tanque tipo A	20	+14	1.29	17	+21	1.54
Christiansen	18	-10	1.12	16	-6	1.41
FAO Tanque tipo A	17	-5	1.09	14	+5	1.25

El método de Penman-Montieth puede proporcionar estimaciones directas de la evapotranspiración real de los cultivos ajustando los valores del albedo y las resistencias aerodinámica y superficial para reflejar las condiciones específicas del cultivo de interés.

La elección del método de estimación de la ET_o es primordial para obtener un balance hídrico correcto y en consecuencia un pronóstico del riego eficiente. A continuación se describen con detalle tres métodos para estimar la evapotranspiración de referencia.

5.3.5 Método del tanque evaporímetro

El método del tanque evaporímetro es el más antiguo y simple de los métodos para estimar la evapotranspiración de referencia y en general la evapotranspiración de los cultivos. Al medir la evaporación en una superficie de agua, integra indirectamente las condiciones. La ecuación para estimar la evapotranspiración tiene la siguiente forma:

$$ET_o = K_t E_t \quad (5.1)$$

Donde el coeficiente de tanque K_t es requerido ya que la evaporación del agua en un tanque es generalmente mayor que la evaporación en el suelo o aún en cuerpos de agua. El valor de K_t varía durante el año dependiendo de las condiciones atmosféricas y de cobertura vegetal alrededor del tanque, con un promedio anual entre 0.7 y 0.8.

Para evitar problemas en la construcción e instalación del tanque, se ha normalizado lo que se conoce como tanque evaporímetro tipo A, que consiste en un tanque cilíndrico de lámina galvanizada con un espesor de 0.8 mm, un diámetro de 120.65 cm y una altura de 25.4 cm, que se coloca en el suelo sobre apoyos de madera. El fondo del tanque debe quedar 15 cm arriba de la superficie original del suelo.

Frevert *et al.*, (1983) presentó una ecuación para evaluar K_t cuyos parámetros fueron obtenidos por la técnica de regresión usando datos experimentales tabulados por Doorenbos y Pruitt (1977) para tanques evaporímetros tipo A, los cuales fueron simplificados por Cuenca y Jensen (Cuenca, 1989) resultando en una ecuación con la siguiente estructura:

$$K_t = 0.475 - 0.00024U_2 + 0.00516HR_m + 0.00118d - 0.000016HR_m^2 - 0.101 \times 10^{-5} d^2 - 0.8 \times 10^{-8} HR_m^2 U_2 - 1 \times 10^{-8} HR_m^2 d \quad (5.2)$$

Donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en km d^{-1} , HR_m es la humedad relativa media diaria en %, d es la cobertura vegetal alrededor del tanque en m por el lado del barlovento ($d < 1000 m$). Los parámetros promedio de la ecuación son obtenidos para el periodo de análisis.

Ejemplo. Estimar el coeficiente del tanque evaporímetro de acuerdo a las siguientes características del tanque: $U_2 = 175 \text{ km d}^{-1}$, $HR_m = 60\%$ y $d = 1000 m$. Usando los datos anteriores y la **ecuación (5.2)** se estima que $K_t = 0.81396$.

Una ecuación empírica alternativa a la anterior es presentada por Allen *et al.*, (1998) para estimar el valor de K_t de un tanque tipo A rodeado de cobertura vegetal:

$$K_t = 0.108 - 0.0286U_2 + 0.0422 \ln(d) + 0.1434 \ln(HR_m) - 0.000631 (\ln(d))^2 \ln(HR_m) \quad (5.3)$$

Donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s^{-1} .

Para el caso de evaporímetros tipo A rodeado de suelo desnudo, Allen *et al.*, (1998) presentaron la siguiente ecuación:

$$K_t = 0.61 + 0.00341 HR_m - 0.000162 U_2 HR_m - 0.00000959 u_2 d + 0.00327 u_2 \ln(d) - 0.00289 u_2 \ln(86.4 d) - 0.0106 \ln(86.4 u_2) \ln(d) + 0.00063 (\ln(d))^2 \ln(86.4 u_2) \quad (5.4)$$

Donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s^{-1} .

Los límites de aplicabilidad de las ecuaciones de Allen et al (1999) son definidos por las siguientes restricciones:

$$1m \leq d \leq 1,000m$$

$$30\% \leq HR_m \leq 84\%$$

$$1ms^{-1} \leq u_2 \leq 8ms^{-1}$$

La siguiente ecuación permite estimar la velocidad del viento a una altura de 2 m (U_2) para el caso que se tenga una estimación de la velocidad (U_z) a una altura diferente z.

$$U_2 = U_z \left[\frac{2}{z} \right]^{0.2} \quad (5.5)$$

Existen varios factores que tienden a producir discrepancias considerables de la evapotranspiración de referencia (ET_o) estimada por el tanque evaporímetro, entre las más importantes se tienen:

- ✓ El color del tanque puede producir diferencias significativas en la evaporación del agua. Un tanque negro evapora más que uno de color blanco debido a que absorbe mas energía calorífica.
- ✓ El albedo de una superficie del agua (0.05 - 0.08) es menor que el de superficies vegetales (0.2 - 0.25).
- ✓ El alto calor específico del agua permite a un cuerpo de agua almacenar calor durante el día y continuar evaporando durante la noche, cuando en las superficies vegetales la evapotranspiración se presenta principalmente durante el día.
- ✓ Las condiciones microclimáticas sobre una superficie libre de agua, en términos de turbulencia, humedad y temperatura, son diferentes a las imperantes en las superficies vegetales.
- ✓ La apertura estomática responde a las condiciones ambientales imperantes, pudiéndose cerrar los estomas con poca humedad en el aire, mientras que en una superficie de agua no existen tales restricciones.

Las condiciones de humedad del suelo, área, altura y tipo de la cobertura vegetal alrededor del tanque pueden cambiar las direcciones del flujo de calor. Un cultivo de porte alto cerca del tanque puede funcionar como cortina rompevientos que restringe el transporte de vapor del agua.

La **Figura 5.8** muestra la variación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida directamente de un tanque evaporímetro usando un coeficiente de tanque de $K_t = 0.791$ y de una estación meteorológica usando la ecuación de Penman-Montieth para el año de 1998 en Chapingo, México.

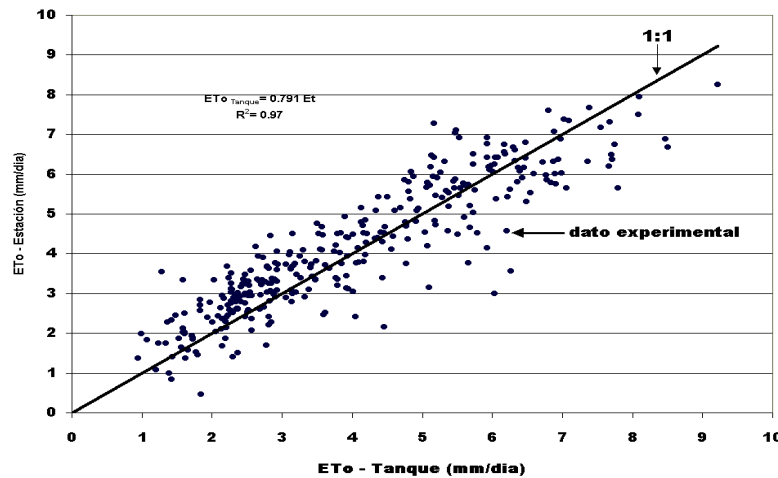


Figura 5.8 Valores de la ET_0 obtenidos a partir de un tanque evaporímetro y una estación meteorológica (ecuación de Penman-Montieth).

5.3.6 Método de Blaney-Criddle

Si se considera que la disponibilidad de datos meteorológicos en la mayoría de las zonas de riego del país es limitada, sobretodo en nuevas zonas de riego. Posiblemente el método de Blaney-Criddle es el único método que se pueda utilizar para estimar la evapotranspiración de referencia, con validez limitada a periodos mensuales.

La ecuación original requiere de solamente datos de temperatura y de la latitud del lugar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_0 = p(0.46 \cdot \bar{T} + 8.13) \quad (5.6)$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en mm d^{-1} como promedio mensual, \bar{T} es la temperatura media diaria del mes en $^{\circ}\text{C}$, y p es el porcentaje diario de las horas de insolación en relación al total del año de acuerdo a la siguiente relación:

$$p_i = \frac{h_d^i}{\sum_{i=1}^{365} h_d^i} 100 \quad (5.7)$$

Donde p_i es el porcentaje horas de insolación para el día "i" con respecto al número total de horas de insolación en el año; h_d^i , es el número de horas de insolación para el día "i"; por ejemplo, un valor diario de $p = 0.41\%$ significa que ese día aporta el 0.41 por ciento del total de horas de insolación del año. Frecuentemente p se presenta como un valor representativo mensual, existen tablas donde se encuentra el valor de p para el día 15 de cada mes. El valor de p depende de la latitud del lugar bajo

consideración. La siguiente ecuación permite calcular el valor de p en función del ángulo de declinación solar en grados (δ) y la latitud en grados.

$$p = 0.00304 \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen}(\delta) \text{sen}(\text{latitud})}{\cos(\delta) \cos(\text{latitud})} \right) \quad (5.8)$$

La declinación solar es evaluada en función de día del año de acuerdo a la siguiente relación:

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.39795 \cos(0.98563(J - 173))) \quad (5.9)$$

Donde J es el día juliano bajo consideración variando de 1 a 365, a excepción de los años bisiestos que varía de 1 a 366. Para el hemisferio sur la constante “- 173” en la ecuación 5.9 debe ser remplazada por “+ 9.5.”

Ejemplo. Se tienen datos de la temperatura media mensual para el mes de junio de la estación Norte (26° 26' Latitud Norte) de la red agrometeorológica del Valle del Carrizo, Sinaloa con un promedio mensual $\bar{T} = 15.7^\circ\text{C}$.

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.39795 \cos(0.98563(166 - 173))) = 23.27^\circ$$

$$p = 0.00304 \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen}(23.27) \text{sen}(26.43)}{\cos(23.27) \cos(26.43)} \right) = 0.3111\%$$

Para una latitud de 26.43° y día 15 de junio ($J = 166$) se tiene que $p = 0.31\%$ por lo tanto la evapotranspiración de referencia diaria para el mes de junio es:

De la **ecuación (5.6)** resulta

$$ET_o = 0.31(0.46 \cdot 15.7 + 8.13) = 4.76 \text{ mm d}^{-1}.$$

Doorenbos y Pruitt (1977) bajo los auspicios de la FAO, desarrollaron diversos trabajos tendientes a mejorar el método de Blaney-Criddle que resultaron en la siguiente ecuación:

$$ET_o = f_e \{ a + b [p(0.46\bar{T} + 8.13)] \} \quad (5.10)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia para pasto en mm d^{-1} , p es el porcentaje medio diario anual de insolación durante el periodo bajo análisis, \bar{T} es la temperatura media en $^\circ\text{C}$, a y b son coeficientes de calibración climática, f_e es un factor de ajuste por la elevación sobre el nivel del mar. Aunque el método original de Blaney-Criddle fue recomendado para periodos mensuales de cálculo, sin embargo, la versión de la FAO ha mostrado excelentes resultados en los cálculos de evapotranspiración diaria (Allen y Pruitt, 1986).

Los coeficientes a y b fueron estimados por regresión usando datos meteorológicos y lisimétricos de 13 sitios alrededor del mundo. Doorenbos y Pruitt (1977) presentaron la siguiente ecuación para evaluar el parámetro "a":

$$a = 0.0043HR_{min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (5.11)$$

Donde HR_{min} es la humedad relativa mínima en porcentaje, n/N es la relación de horas de insolación (n) con respecto a las del fotoperiodo (N).

Doorenbos y Pruitt (1977), presentaron los diferentes valores del parámetro b en forma tabular como función de la humedad relativa, velocidad del viento y la relación n/N . Sin embargo, Frevert *et al.*, (1983) generaron una ecuación usando técnicas de regresión múltiple y los datos tabulares de Doorenbos y Pruitt, la cual fue posteriormente simplificada por Cuenca y Jensen (Cuenca,1989) con la siguiente estructura:

$$b = 0.82 - 0.0041HR_{min} + 1.07 \frac{n}{N} + 0.066U_d - 0.006HR_{min} \frac{n}{N} - 0.0006HR_{min}U_d \quad (5.12)$$

Donde U_d es la velocidad del viento en $m\ s^{-1}$ durante las horas diurnas a una altura de 2 m. La FAO define arbitrariamente las horas diurnas de 7 am a 7 pm.

El factor f_e puede ser estimado por la siguiente relación:

$$f_e = 1 + 10^{-4} ELEV \quad (5.13)$$

Donde $ELEV$ es la elevación del sitio en estudio en metros sobre el nivel del mar.

5.3.7 Ecuación de Priestley y Taylor

Una de las ecuaciones más simples basada en datos de temperatura y radiación solar pero con significado físico fue propuesta por Priestley y Taylor para calcular la evapotranspiración de referencia ($mm\ d^{-1}$) con la siguiente estructura:

$$ET_o = \kappa \frac{\Delta R_n}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (5.14)$$

Donde κ es el parámetro de Priestley-Taylor, Δ es la pendiente de curva de la presión de vapor a saturación ($kPa\ ^\circ C^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización ($2.45\ MJ\ kg^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($kPa\ ^\circ C^{-1}$), y R_n es la radiación neta ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$).

El parámetro κ puede ser obtenido al comparar valores estimados con los valores experimentales. Priestley y Taylor propusieron un valor de $\kappa = 1.26$ cuando la superficie está en su tasa evapotranspirativa máxima posible (evaporación potencial).

Es posible expresar la energía por unidad de área en lámina evaporable y viceversa. A esta energía se le conoce como calor requerido para vaporizar agua libre o simplemente calor latente de vaporización (λ) y tiene un valor de 2.45 MJ kg^{-1} a 20°C . Lo cual indica que se requieren 2.45 MJ para vaporizar un kilogramo de agua o un litro de agua o 0.001 m^3 . Se formaría una lámina de un milímetro al aplicar un litro de agua (0.001 m^3) en un m^2 , que requerirán de una energía de 2.45 MJ m^{-2} para evaporarla.

Ejemplo. Estimar la evapotranspiración de referencia asumiendo que $\Delta = 0.162 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$, $R_n = 9.89 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $\gamma = 0.067286 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$ y una densidad del agua de $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$.

$$ET_o = \kappa \frac{\Delta R_n}{\lambda (\Delta + \gamma)} = 1.26 \frac{0.162 \times 9.89}{2.45(0.162 + 0.067286)} = 3.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ d}} \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 3.6 \text{ mm d}^{-1}$$

En la **Tabla 5.4** se presentan algunas equivalencias de interés con el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Tabla 5.4 Equivalencias de unidades relacionadas con la evapotranspiración.

Unidad	Equivalencia
1 MJ	$1 \times 10^6 \text{ J}$
1 langley	1 cal cm^{-2}
1 W m^{-2}	$0.0864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} = 2.0636 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 0.035 \text{ mm d}^{-1}$
1 $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$23.884 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 11.6 \text{ W m}^{-2} = 0.408 \text{ mm d}^{-1}$
1 mm d^{-1}	$2.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} = 58.6 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 28.57 \text{ W m}^{-2}$

5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LOS CULTIVOS BAJO CONDICIONES ESTÁNDARES (ET_c)

Hasta ahora se ha presentado como evaluar la evapotranspiración de referencia, sin embargo, el objetivo final de este capítulo es la estimación de la evapotranspiración real de los cultivos bajo condiciones estándares (ET_c) las cuales asumen que el cultivo se encuentra bajo niveles óptimos de humedad, sanidad, fertilidad del suelo, y con un buen manejo agronómico para obtener los máximos rendimientos potenciales.

La **Tabla 5.5** compilada por Doorenbos y Pruitt (1977), resume las variaciones de la ET_c bajo diferentes condiciones ambientales alrededor del mundo. La alta variabilidad de la evapotranspiración se debe tanto a la enorme variabilidad climática como a las variedades disponibles.

Tabla 5.5 Rangos de variación de la evapotranspiración de los principales cultivos durante su ciclo fenológico (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Cultivo	ET_c acumulada (mm)	Cultivo	ET_c acumulada (mm)
Aguacate	650-1000	Alfalfa	600-1500

Cultivo	ET _c acumulada (mm)	Cultivo	ET _c acumulada (mm)
Algodón	550-950	Arroz	500-950
Cacao	800-1200	Cafeto	800-1200
Caña de azúcar	1000-1500	Cebolla	350-600
Dátil	900-1300	Frijol	250-500
Frutales caducifolios	700-1050	Granos pequeños	300-450
Hortalizas	250-500	Lino	450-900
Maíz	400-750	Naranja	600-950
Nogal	700-1000	Papa	350-625
Papa dulce	400-675	Plátano	700-1700
Remolacha azucarera	450-850	Semillas oleaginosas	300-600
Sorgo	300-650	Soya	450-825
Tabaco	300-500	Tomate	300-600
Toronja	650-1000	Vid	450-900

La metodología para la estimación de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) consiste en tres partes (ver **Figura 5.5**):

1. Estimar la tasa de referencia con especificaciones en el suministro de agua y tipo de cultivo bien definido (ET_o).
2. Ajustar la tasa de referencia en función de las características del cultivo a fin de obtener la evapotranspiración potencial del cultivo (ET_c).
3. Ajustar la ET_c en función de las condiciones locales y prácticas agrícolas que influyen en la estimación de la evapotranspiración real (ET_r) como son la salinidad, déficit hídrico, tamaño de las parcelas, métodos de riego y cultivo.

Una vez que se ha estimado la evapotranspiración de referencia (ET_o) como primer paso (1), el siguiente paso (2) es calcular la evapotranspiración real máxima de un cultivo que correspondería a su evapotranspiración potencial o evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares (ET_c) y consiste en multiplicar la evapotranspiración de referencia por un factor de escala llamado coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) que depende principalmente del tipo y etapa fisiológica del cultivo. La ecuación que define dicha relación es:

$$ET_c \approx ET_p = K_{cb} ET_o \quad (5.15)$$

El último paso (3) para evaluar la ET_r es tomar en cuenta las condiciones locales y de manejo del cultivo. Hasta ahora se ha considerado a K_{cb} como independiente del contenido de humedad del suelo.

Bajo un déficit de humedad, los estomas de las plantas se cierran y la tasa evapotranspirativa se reduce, por lo tanto el valor de la evapotranspiración debe de reducirse con la introducción de un factor de estrés (K_e) que varía entre 0 y 1. De esta manera, la estimación de la evapotranspiración de los cultivos bajo condiciones no

estándares (ET_r) es más realista y menor que la evapotranspiración bajo condiciones estándares (ET_c). Una versión para estimar la evapotranspiración real es:

$$ET_r = K_e K_{cb} ET_o \quad (5.16)$$

En la ecuación anterior se realiza un ajuste a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares para incorporar las condiciones del suelo con el factor K_e . Diferentes enfoques han sido propuestos para incluir otros factores que afectan el consumo de agua por los cultivos bajo condiciones de suelo y manejo no óptimas.

5.4.1 Coeficiente de cultivo basal (K_{cb})

Los coeficientes de cultivo basal (K_{cb}), son la representación cuantitativa normalizada de la evapotranspiración de un cultivo (ET_c) en relación con la evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo del ciclo fenológico de un cultivo.

$$K_{cb} = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (5.17)$$

El coeficiente de cultivo basal integra implícitamente varias características primarias que distinguen a los cultivos del cultivo de referencia, entre las que destacan las siguientes:

- Reflectancia o albedo de la superficie follaje-suelo.
- Altura del cultivo.
- Resistencia del follaje a la transferencia de vapor.
- Evaporación del suelo.

Se ha dedicado un gran esfuerzo para obtener los coeficientes de cultivo basal de los diferentes cultivos agrícolas en cada etapa fenológica. Existen valores de K_{cb} en función del tiempo reportados para varios cultivos agrícolas. El manual 24 de la FAO (Doorembos y Pruitt, 1977) o su versión actualizada conocido como manual 56 (Allen *et al.*, 1998) se han tomado como la fuente estándar de curvas de K_{cb} , en dichos manuales se presentan las curvas para K_{cb} en función del tiempo transcurrido desde la siembra o trasplante. Para cultivos anuales, existe una variación distinguible de acuerdo con la etapa fenológica, La **Figura 5.9** muestra la variación de K_{cb} para las cuatro fases fenológicas (inicial, desarrollo, intermedia, tardía) en las que se puede dividir el ciclo de un cultivo anual bajo condiciones de riego.

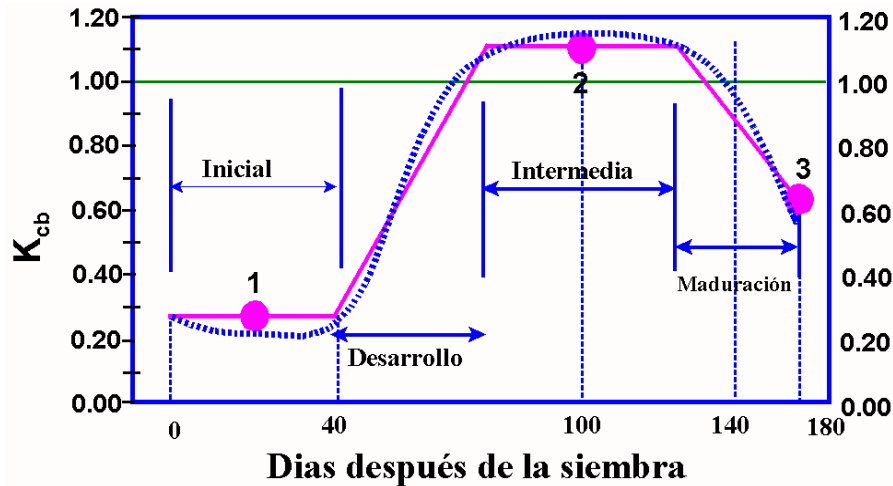


Figura 5.9 Variación del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) en función del ciclo fenológico con la curva real y la curva aproximada por interpolación lineal.

Durante la etapa inicial el valor de K_{cb} es bajo. El cultivo empieza a consumir agua hasta que emerge. Sin embargo, desde que se siembra el valor del K_{cb} es mayor que cero ya que considera la evaporación del suelo. El valor de K_{cb} para la etapa inicial depende de la ET_o y del intervalo de riego o lluvia. Para la siguiente fase (intermedia), el valor del K_{cb} refleja la fisiología del cultivo y su área foliar. Cuando el cultivo alcanza cobertura máxima, el valor del K_{cb} es máximo ya que el cultivo está capturando la máxima cantidad de radiación solar. En la etapa final el consumo de agua de los cultivos empieza a disminuir gradualmente hasta llegar a la cosecha, pudiendo llegar a cero dependiendo de la condición final del producto, si es en verde o en seco.

A continuación se describen las principales etapas que definen la variación del coeficiente de cultivo:

- **Inicial** - Desde la germinación hasta el crecimiento temprano cuando la cobertura vegetal es baja (menor del 10%).
- **Desarrollo del cultivo** - Desde el final de la etapa inicial hasta que se alcance una cobertura vegetal efectiva del 70-80%.
- **Intermedia o crítica** - Desde el final de la etapa de desarrollo hasta el inicio de la maduración. En la etapa intermedia se presentan los requerimientos hídricos máximos de los cultivos, presentándose valores mayores o cercanos a los del cultivo de referencia por lo que $K_{cb} \geq 1$, tal como se muestra en la **Figura 5.10**.

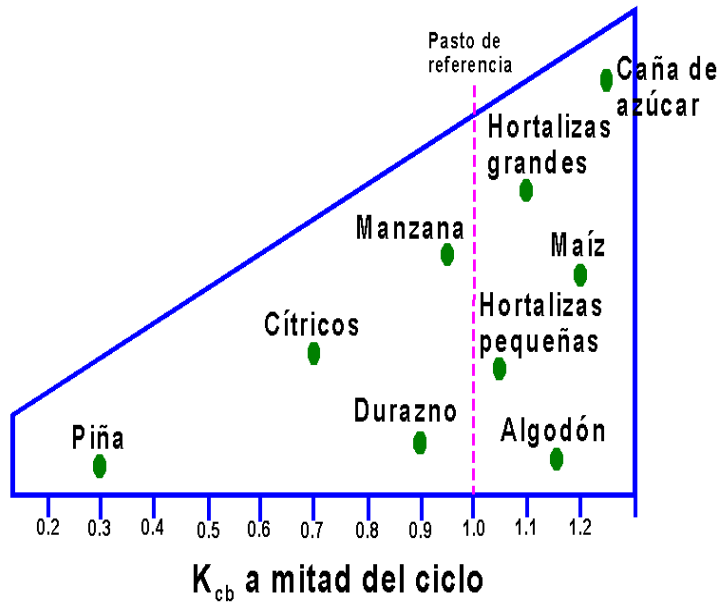


Figura 5.10 Valores típicos de K_{cb} para diferentes cultivos en la etapa de máxima cobertura vegetal (fuente: Allen, *et al.*, 1998).

- Tardía o de maduración** - Desde la etapa intermedia hasta la madurez total o cosecha. El valor del coeficiente K_{cb} en la última etapa depende del grado de humedad del producto vegetal a cosechar, granos verdes se cosechan cuando la planta todavía está transpirando, mientras que la cosecha de granos secos se realiza cuando la transpiración es prácticamente nula como se muestra en la **Figura 5.11**. Por ejemplo, el maíz para ensilar tiene un valor de K_{cb} , al momento de la cosecha, mayor que el maíz para elote y mucho mayor que el maíz para grano.

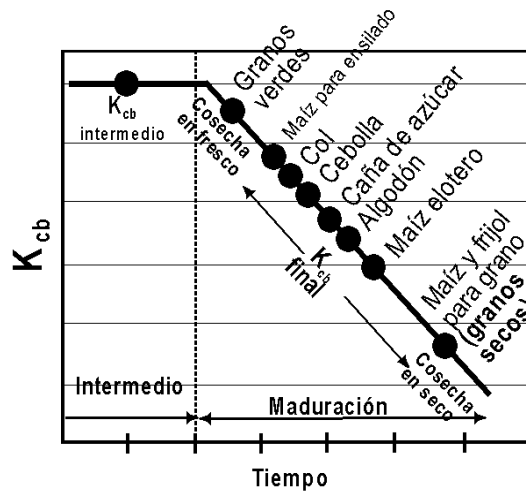


Figura 5.11 Variación cualitativa del coeficiente de cultivo basal para varios cultivos en la última fase fenológica (fuente: Allen, *et al.*, 1998).

Hasta ahora se han visto los coeficientes de cultivo basales (K_{cb}) típicos bajo condiciones climatológicas estándares, que de acuerdo con Allen *et al.*, (1998), son aquellas con un clima subhúmedo con humedades relativas diurnas de 45% y con vientos menores a 2 m s^{-1} . Las variaciones del K_{cb} , en el periodo de máxima cobertura vegetal bajo condiciones extremas, se muestran en la **Figura 5.12**. Donde el extremo derecho representa condiciones de máxima demanda dadas por condiciones de demanda evapotranspirativa extrema (días secos y con vientos), mientras que el izquierdo representa condiciones de mínima demanda (días calmados y húmedos).

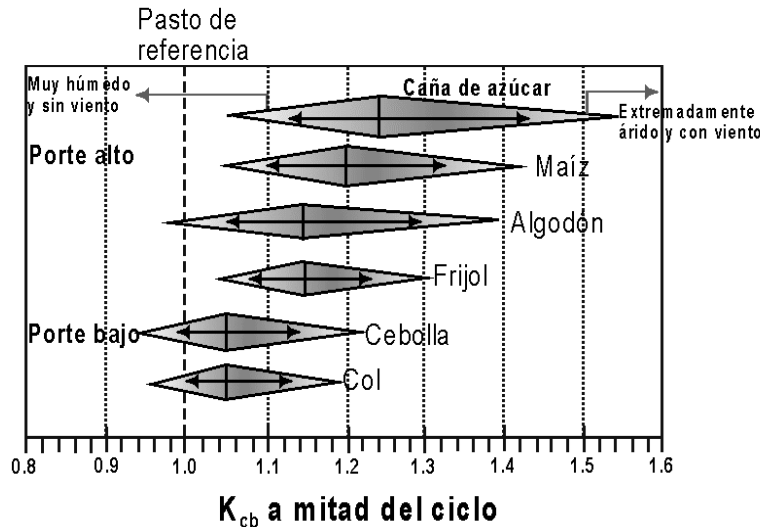


Figura 5.12 Variación del K_{cb} en función de las condiciones climáticas durante la etapa de máxima cobertura vegetal (Fuente: Allen, *et al.*, 1998).

La opción de expresar el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) en función de los días después de emergencia, trasplante o cualquier otra forma explícita del tiempo tiene asociado varios errores debido a la variabilidad climática entre ciclos agrícolas. Ante estas limitaciones han surgido alternativas como la normalización de los K_{cb} en función del tiempo (Jensen *et al.*, 1990), días grado crecimiento, unidades termales solares o evapotranspiración de referencia acumulada.

5.4.2 Cálculo del coeficiente de cultivo mediante el método FAO

El método de la FAO para calcular los valores de K_{cb} , consiste en ajustar la curva real (ver **Figura 5.9**) con base en cuatro segmentos de líneas rectas, para lo cual se asume un valor constante para las etapas inicial e intermedia. El método requiere de tres valores de K_{cb} así como la duración de las cuatro fases para formar la curva de K_{cb} tal como se muestra cualitativamente en la **Figura 5.9** y cuantitativamente en la **Tabla 5.6**.

Para la etapa inicial se asume un valor constante del coeficiente basal ($K_{cb}]_1 = C$) para lo cual Doorembos y Pruitt (1977) presentaron una gráfica para su estimación; sin

embargo, Cuenca (1989) presentó las siguientes ecuaciones para evaluarlo, obtenidas a partir de las curvas de Doorembos y Pruitt:

$$K_{cb}]_1 = \{1.286 - 0.27 \ln(I_r)\} e^{(-0.01 - 0.042 \ln(I_r)) ET_o]_1}, \quad I_r \leq 4 \text{ días} \quad (5.18)$$

Donde I_r es el intervalo de riego o lluvia en días para la etapa inicial, $ET_o]_1$ corresponde al promedio de la evapotranspiración de referencia en mm d^{-1} durante la etapa inicial. Para intervalos de riego mayores de cuatro días la relación es:

$$K_{cb}]_1 = 2(I_r)^{-0.49} e^{(-0.02 - 0.04 \ln(I_r)) ET_o]_1}, \quad I_r > 4 \text{ días} \quad (5.19)$$

Ejemplo. La frecuencia de riego o lluvia para la primera etapa es de $I_r = 10$ días y asumiendo una evapotranspiración promedio en la primera etapa de 5.5 mm d^{-1} , el valor del coeficiente de cultivo usando la **ecuación (5.19)** es de 0.35.

Para la etapa de desarrollo se asume una relación lineal. Para estimar el valor de K_{cb} en el día n (D_n) dentro de la fase i ($K_{cb}]_n$) se puede usar la siguiente ecuación:

$$K_{cb}]_n = K_{cb}]_{i-1} + \frac{D_n (K_{cb}]_i - K_{cb}]_{i-1})}{DF_i} \quad (5.20)$$

Donde $K_{cb}]_i$ y $K_{cb}]_{i-1}$ son los valores de K_{cb} al final e inicio de la etapa i bajo interpolación lineal, respectivamente, DF_i es la duración en días de la fase i .

Para la etapa crítica o intermedia se asume un valor de K_{cb} constante, mientras que para la etapa de maduración se asume una relación lineal de manera similar a la etapa de desarrollo.

Los parámetros para estimar el K_{cb} de acuerdo a la metodología de la FAO se encuentran representados en la **Tabla 5.6** para varios cultivos para el ciclo otoño-invierno en el norte del estado de Sinaloa, México.

Tabla 5.6 Coeficientes de cultivo (K_{cb}) para varios cultivos para la región norte de Sinaloa, México.

Fase	Inicial	Desarrollo	Intermedia	Maduración
Algodón				
Duración (días)	30	65	70	75
K_{cb}	0.26	-	1	0.5
Maíz				
Duración (días)	20	70	40	50
K_{cb}	0.3	-	1.1	0.5
Sorgo				
Duración (días)	20	30	25	20
K_{cb}	0.3	-	1	0.55
Trigo				
Duración (días)	15	40	35	40
K_{cb}	0.26	-	1.1	0.45

Ejemplo de cálculos. Determinar los valores de K_{cb} para maíz de grano para los días 24 y 150 en la región de Los Mochis, Sinaloa para el ciclo otoño-invierno de acuerdo a los parámetros de la **Tabla 5.6**:

$$K_{cb}]_{n=24} = K_{cb}]_1 + \frac{D_{24} (K_{cb}]_3 - K_{cb}]_1)}{DF_2} = 0.3 + \frac{4 * (1.1 - 0.3)}{70} = 0.35$$

$$K_{cb}]_{n=150} = K_{cb}]_3 + \frac{D_{150} (K_{cb}]_4 - K_{cb}]_3)}{DF_3} = 1.1 + \frac{20 * (0.5 - 1.1)}{50} = 0.86$$

Donde D_{24} corresponde al día 4 de la fase de desarrollo y D_{150} corresponde al día 20 de la fase de maduración.

5.4.3 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo basal (K_{cb})

El coeficiente de cultivo está relacionado con el índice de área foliar. La **Figura 5.13** muestra una sección de 10 m por 1 m de una línea de cultivo, el porcentaje de cobertura en el área de 10 m² es alrededor del 60%, de esta manera el coeficiente de cultivo será del 60% del valor máximo del coeficiente de cultivo, si este último se asume igual a 1, el coeficiente de cultivo sería de 0.6. En algunas ocasiones se presentan los coeficiente de cultivo para hortalizas en función del ancho de la cobertura vegetal (A_v) y ancho de la cama (A_c).

$$f_c = \frac{A_v}{A_c} \quad (5.21)$$

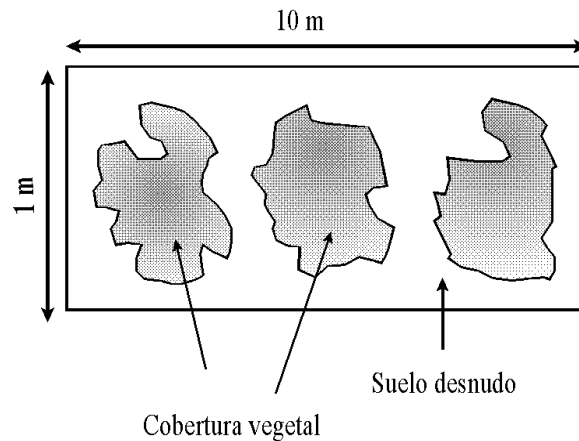


Figura 5.13 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo.

En la **Tabla 5.7** se presentan algunos coeficientes para la zona de California en función del factor de cobertura f_c .

Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo para algunas hortalizas sembradas en el estado de California (USA) en función del ancho del follaje y ancho de cama (Hanson et. al., 1999).

Cultivo	Factor de cobertura (f_c)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Brócoli	0.20	0.29	0.4	0.48	0.60	0.70	0.78	0.87	0.98	1.02
Cebolla	0.25	0.48	0.61	0.72	0.78	0.83	0.88	0.91	0.92	0.93
Fresa	0.08	0.26	0.34	0.43	0.50	0.59	0.65	0.71		
Lechuga	0.18	0.30	0.38	0.49	0.60	0.70	0.79			

Hanson *et al.*, (1999) presentó la siguiente ecuación que permite estimar la el coeficiente de cultivo en la etapa de desarrollo del cultivo en función del factor de cobertura f_c y de los valores de K_c en las etapas inicial y crítica (intermedia):

$$K_c = K_{c1} + (K_{c2} - K_{c1}) \frac{(f_c - 1)}{6.5} \quad (5.22)$$

Donde:

K_{c1} : es el coeficiente de cultivo para la etapa inicial (10 % de cobertura vegetal).

K_{c2} : es el coeficiente de cultivo para la etapa crítica (75 % de cobertura vegetal).

Ejemplo. Si se tiene el cultivo de cebolla con un valor de $K_{c1} = 0.18$ y $K_{c2} = 0.93$. Calcular el valor de K_c para un factor $f_c = 0.5$.

$$K_c = K_{c1} + (K_{c2} - K_{c1}) \frac{(f_c - 1)}{6.5} = 0.18 + (0.93 - 0.18) \frac{0.5 - 0.1}{6.5} = 0.23$$

5.4.4 Coeficiente de cultivo para frutales jóvenes

Se han propuesto diferentes alternativas para estimar la evapotranspiración de frutales en árboles jóvenes con respecto a la calculada para árboles maduros usando un factor de corrección basado en el área sombreada.

$$K_{cb}^* = K_{cb} f_s \quad (5.23)$$

Donde:

K_{cb}^* : es el coeficiente de cultivo basal para un frutal joven.

K_{cb} : es el coeficiente de cultivo basal para un frutal maduro.

f_s : es el porcentaje evapotranspirativo de un árbol joven expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros.

Para estimar el volumen transpirado por un frutal se puede utilizar la relación siguiente:

$$V_n = ET_r A_t = K_{cb} f_s ET_o A_t \quad (5.24)$$

Donde:

ET_r : es la evapotranspiración acumulada desde el último riego para un frutal maduro.

A_t : es el área total cultivada.

f_s : es factor de sombreado, dado por la siguiente ecuación.

$$f_s = (f_o - 1) e^{-(f_1 R)^2} + 1 \quad (5.25)$$

Donde:

f_o : es el valor inicial de la evapotranspiración de un árbol recién plantado con respecto a uno maduro, usualmente entre 0.1 y 0.3.

f_1 : es un factor de forma de crecimiento del tipo de árbol, un valor de $f_1 = 3$ define la forma de crecimiento de árboles jóvenes de acuerdo a datos experimentales que presentan un valor máximo de sombreado cuando $R > 0.7$.

R : es la fracción de sombreado, fracción de la superficie con cobertura vegetal, usualmente calculada como el área sombreada por la planta con respecto al área total de influencia de una planta. La fracción de sombrado R puede estimarse como:

$$R = \frac{A_s}{A_t} \quad (5.26)$$

Donde A_s , es el área de sombreado de un árbol joven, asumiendo un sombreado circular de diámetro D_s del follaje se tiene:

$$A_s = \pi \frac{D_s^2}{4} \quad (5.27)$$

Para efectos prácticos el diámetro D_s puede estimarse de la sombra proyectada por el follaje sobre la superficie del suelo al mediodía (12 - 13 pm).

El área total de un árbol maduro puede estimarse del espaciamiento de los árboles:

$$A_t = S_h S_a \quad (5.28)$$

Donde:

S_h : es el espaciamiento entre hileras de árboles.

S_a : es el espaciamiento entre árboles dentro de las hileras.

Ejemplo. Estimar el volumen evapotranspirado de una hectárea de naranjos jóvenes desde el último riego, asumiendo un valor de ET_r para árboles maduros de 10 cm, valores de R de 0.1, $f_o = 0.2$ y $f_1 = 3$.

$$f_s = (f_o - 1) e^{-(f_1 R)^2} + 1 = (0.2 - 1) e^{-(3 \times 0.1)^2} + 1 = 0.2688$$

$$V_n = ET_r A f_s = 0.10 m (10000 m^2) 0.2688 = 268.85 m^3$$

La **Figura 5.14** presenta la forma de la **ecuación (5.25)** para un valor inicial de $f_o = 0.2$ y $f_1 = 3$.

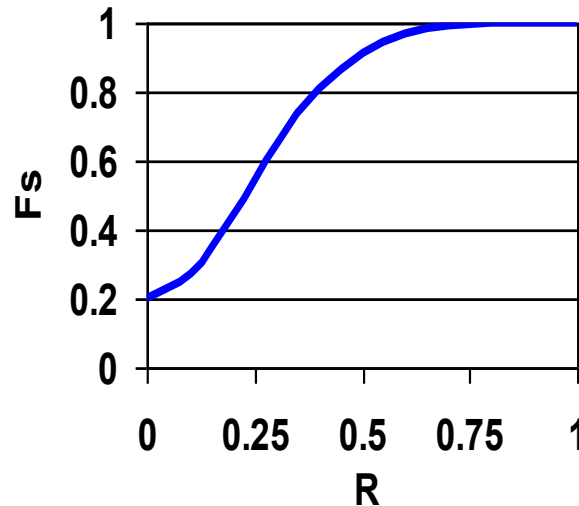


Figura 5.14 Variación del factor evapotranspirativo (f_s) para árboles jóvenes, expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros, en función del porcentaje de sombreado (R).

Es común expresar los requerimientos de riego en volumen de agua por unidad de longitud para cultivos en hilera. La siguiente expresión permite estimar el volumen a aplicar por unidad lineal de hilera de cultivo:

$$V_n = \frac{ET_r A}{L_t} f_s \quad (5.29)$$

Donde:

L_t : es la longitud total de todas las líneas de cultivo, usualmente coincide con la longitud de las cintas o laterales regantes.

5.5 COEFICIENTES DE CULTIVO BAJO CONDICIONES NO ESTÁNDARES (Kc)

Se han presentado las bases para estimar la evapotranspiración bajo condiciones estándares, esto es, sin problemas de sanidad, humedad y manejo. A continuación se presentan las ecuaciones de los coeficientes requeridos para un cultivo bajo condiciones no estándares.

Aunque la estimación precisa del coeficiente de cultivo bajo condiciones no estándares es difícil, existe una ecuación propuesta por Harrington y Heerman (1981), que puede usarse para calcular el valor del coeficiente de cultivo bajo condiciones de humedad no estándares K_c .

$$K_c = K_{cb} K_e + K_v \quad (5.30)$$

Donde K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo (sin déficit hídrico y de cualquier otra restricción que afecte el crecimiento normal de un cultivo), K_e es el factor de reducción de K_{cb} debido exclusivamente al estrés hídrico o déficit de humedad hídrico, K_v es un factor evaporativo de ajuste que considera la evaporación de la superficie del suelo después de un evento de riego.

Cuando la humedad aprovechable está cercana al 100%, las plantas se encuentran con el mínimo estrés ($K_e = 1$), a medida que la humedad aprovechable se aproxima a cero, el estrés de la planta se incrementa y por ende la planta reduce su transpiración potencial y el factor K_e se aproxima a cero.

Existen varias propuestas para estimar el factor K_e Ritchie (1973) utilizó una relación lineal para evaluar dicho coeficiente por medio de fracciones, representando la relación entre la humedad aprovechable (HA) y la humedad aprovechable crítica (HA_c), de acuerdo a las siguientes expresiones lineales:

$$K_e = \frac{HA}{HA_c}, \quad \text{sí } HA < HA_c \quad (5.31)$$

$$K_e = 1.0, \quad \text{sí } HA \geq HA_c$$

Donde HA_c , es el valor crítico de la humedad aprovechable en porcentaje que representa la tolerancia a la sequía del cultivo. Un valor pequeño (25% - 50%) implica un cultivo tolerante a la sequía mientras que un valor alto (75% - 100%) representa un cultivo sensible a la sequía.

Jensen *et al.*, (1970) propuso otra ecuación logarítmica empírica que relaciona a K_e en función de la humedad aprovechable disponible (HAD) de acuerdo a la siguiente relación:

$$K_e = \frac{\ln(HAD + 1)}{\ln(101)} \quad (5.32)$$

La humedad aprovechable disponible en % es evaluada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$HAD(\%) = 100 \left[1 - \frac{D}{HA} \right] \quad (5.33)$$

Donde D , es el déficit de humedad actual en L y HA es la humedad aprovechable total en L en la zona radical. Para un suelo estratificado la humedad aprovechable total es evaluado con la siguiente expresión:

$$HA = \sum_{j=1}^n P_j HA_j \quad (5.34)$$

Donde:

n : es el número de estratos que conforman la zona radical.

P_j : es el espesor del estrato j , de manera que la suma de todos los estratos (P_j) debe ser igual a la profundidad radical (P_r), el espesor del último estrato va aumentando para ajustarse a la profundidad radical del día i :

$$P_{r-i} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5.35)$$

Cuando $HAD = 100\%$ se tiene $K_e = 1$ lo cual indica que el cultivo no se encuentra bajo estrés hídrico y cuando $HAD = 0\%$ se tiene un factor de estrés hídrico $K_e = 0$, que indica que el cultivo se encuentra totalmente estresado por déficit hídrico. La **Figura 5.15** muestra una representación gráfica de ambos métodos para evaluar K_e , para la relación lineal se presentan dos valores de HA_c (40 y 80%).

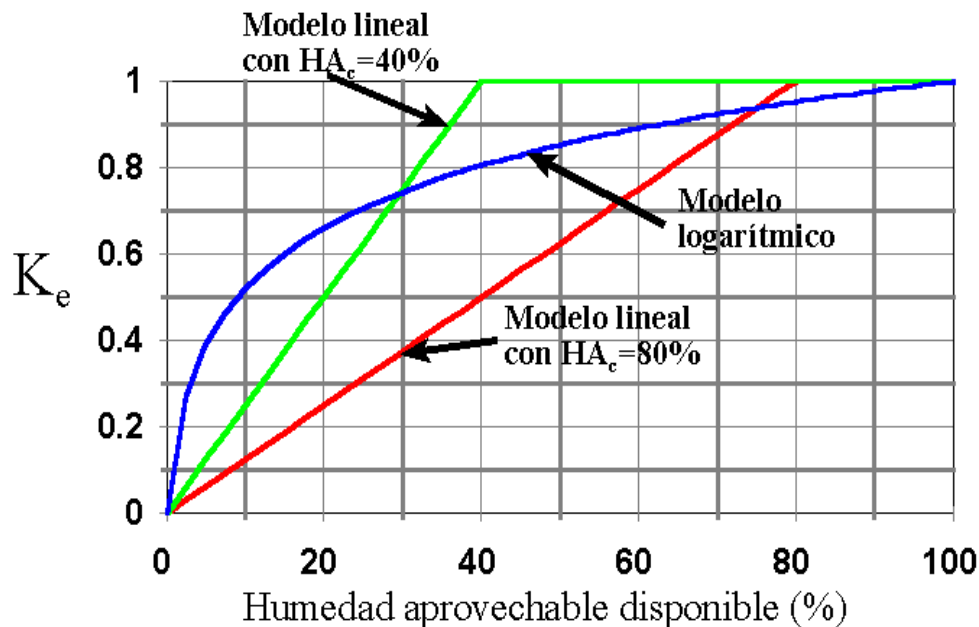


Figura 5.15 Variación del factor de estrés hídrico del suelo (K_e) de acuerdo a dos modelos: lineal y logarítmico.

La **Tabla 5.8** muestra los requerimientos de riego estimados para el trigo durante el ciclo otoño - invierno 98 - 99 en el Valle del Carrizo, Sinaloa asumiendo que no hubo

lluvias significativas durante el ciclo. Se observa una alta dependencia de los riegos a la fecha de siembra. La diferencia entre la lámina potencial y la real es que la primera no considera un estrés hídrico (K_e) de los cultivos, mientras que la segunda si lo considera. La diferencia se debe a las características intrínsecas del riego por gravedad al cambiar el suelo de un alto a un bajo contenido de humedad varias veces durante el ciclo fenológico de un cultivo. Al disminuir el contenido de humedad, también disminuye la evapotranspiración real del cultivo por debajo de la evapotranspiración potencial.

Tabla 5.8 Requerimientos netos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el Valle del Carrizo. Ln es lámina neta parcelaria.

Fecha siembra Trigo	Número riegos auxilio	Max. Ln por riego auxilio (mm)	Ln potencial (mm)	Ln real (mm)	Máximo Intervalo de riego (días)	Mínimo intervalo de riego (días)
5/11/98	2	67	264	222	56	25
15/11/98	2	66	270	214	57	25
25/11/98	3	67	283	245	57	25
5/12/98	3	65	303	262	54	23
15/12/98	3	65	324	280	55	20
25/12/98	3	71	328	284	53	17
5/1/99	4	65	381	331	50	16

La evaporación del agua del suelo depende de varios factores:

- Porcentaje de cobertura (sombreado) del cultivo.
- Cantidad de humedad disponible en la superficie.
- Propiedades hidrodinámicas del estrato superior del suelo.
- Capacidad evapotranspirativa de la atmósfera.

Una manera empírica de estimar el componente evaporativo del suelo es usar parámetros empíricos relacionados con los factores anteriores. Wright (1982) presentó un procedimiento para estimar el factor evaporativo K_v basado en la siguiente ecuación:

$$K_v = F_m (1 - K_{cb}) \left(1 - \sqrt{\frac{t}{t_d}} \right) \quad (5.36)$$

Donde F_m , es el factor de mojado que define la fracción de la superficie del suelo mojado por el sistema de riego (ver **Tabla 5.9**), t_d son los días requeridos para secar la superficie del suelo (**Tabla 5.10**), t son los días transcurridos desde el evento de riego o lluvia. La ecuación anterior es válida para $t \leq t_d$, para $t > t_d$, K_v toma un valor de cero.

Tabla 5.9 Factor de mojado (F_m) para diferentes sistemas de riego (Martin et al., 1990).

Sistema de riego	F_m
Lluvia	1
Aspersión	1
Melgas y Bordos	1
Surcos Profundos	1
Surcos poco profundos	0.5
Surcos alternos	0.5
Goteo	0.25

Tabla 5.10 Valores típicos de tiempos de secado (t_d) y el factor de persistencia (P_f) para suelos agrícolas (Hill et al., 1983).

Factor	Arcilla	Franco Arcilloso	Franco Limoso	Franco Arenoso	Arena Franca	arena
t_d	10	7	5	4	3	2
P_f	3.89	2.9	2.26	1.92	1.6	1.29

La cantidad de agua evaporada de la superficie húmeda de un suelo (EV_s) para un día t esta dada por:

$$EV_s = K_v ET_o \quad (5.37)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia para el día t .

Sin embargo, el valor total posible del agua evaporada debe ser menor de la cantidad de lluvia o riego aplicada. Hill *et al.*, 1983, presentó una alternativa para tomar en cuenta esta posibilidad al introducir un factor de persistencia P_f definidos en la **Tabla 5.10**. La evaporación total de una superficie húmeda del suelo durante un evento de mojado-secado (EV_t) puede ser estimada con la siguiente ecuación:

$$EV_t = P_f F_m [1 - K_{cb}] ET_o \quad (5.38)$$

Donde P_f es un factor de persistencia que representa el efecto acumulado de la evaporación de superficie del suelo húmedo, los valores ET_o y K_{cb} son valores promedio durante el periodo de secado, el valor máximo posible de EV_t es la cantidad de lluvia o riego aplicado.

Ejemplo. Se tiene un suelo arcilloso regado por surcos alternos. Calcular el valor de K_v para el día 2, con $ET_o = 5 \text{ mm/d}$ y $K_{cb} = 0.5$, después de aplicado el riego.

$$K_v = 0.5(1 - 0.5) \left(1 - \sqrt{\frac{2}{10}} \right) = 0.1382$$

$$EV_s = 0.1382 * 5 = 0.691 \text{ mm/d}$$

La **Figura 5.16** describe el comportamiento del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) relacionado con un manejo de cultivo estándar, mientras que el coeficiente K_c define condiciones más realistas al considerar un manejo del cultivo no estándar.

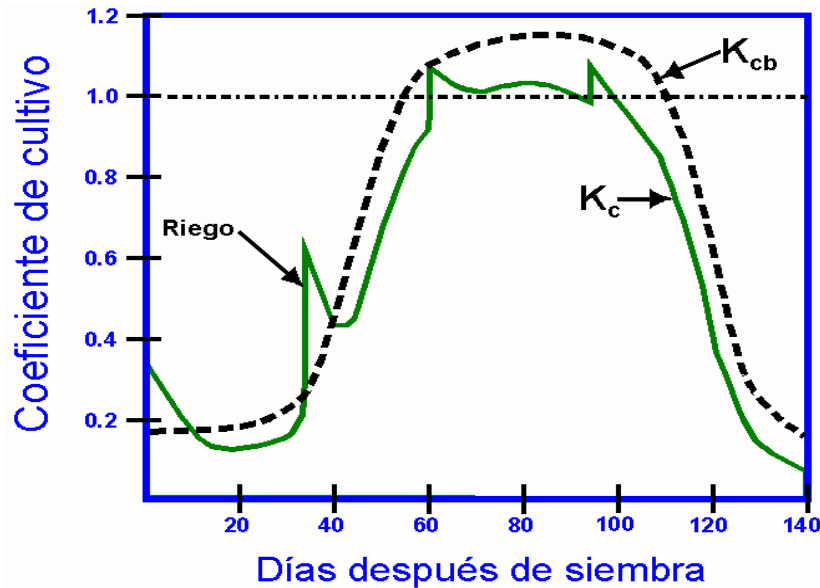


Figura 5.16 Comparación del coeficiente de cultivo bajo condiciones estándares (K_{cb}) y no estándares (K_c).

La **Figura 5.17** muestra la variación de los tres tipos de evapotranspiración. La parte superior muestra la evapotranspiración de referencia (ET_o), la curva intermedia describe la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares (ET_c) y finalmente la curva inferior muestra la evapotranspiración real (ET_r) para el cultivo de maíz, bajo riego por gravedad, sembrado el 17 de octubre de 1996 y cosechado el 27 de febrero con una duración de 134 días.

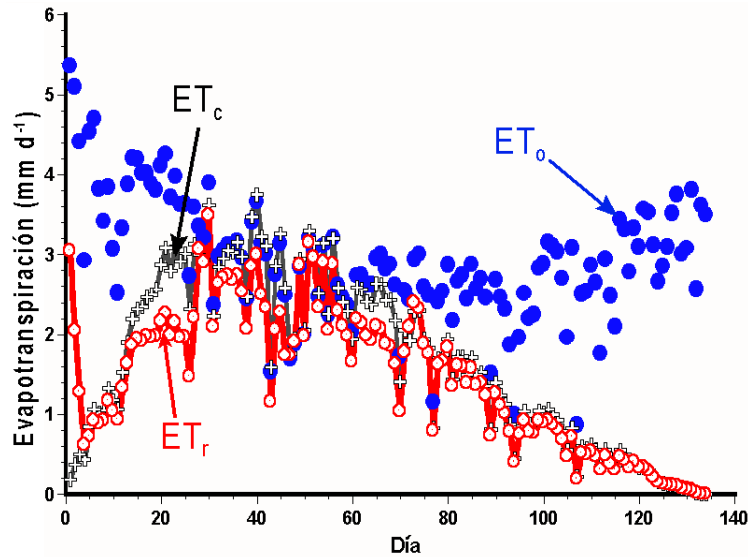


Figura 5.17 Variación de la evapotranspiración en sus tres versiones (referencia, cultivo y real) para el cultivo de maíz otoño-invierno en el Valle del Fuerte, Sinaloa.

5.6 EJEMPLOS

Ejemplo 5.6.1 Estimar el coeficiente de un tanque evaporímetro rodeado de cultivos irrigados con las siguientes características: $U_2 = 4 \text{ m s}^{-1}$, $HR_m = 60\%$, $d = 100\text{m}$.

Utilizando la **ecuación (5.3)** de Allen et al., (1998); para un tanque tipo A rodeado de cultivos irrigados:

$$\begin{aligned}
 K_t &= 0.108 - 0.0286(4 \text{ m s}^{-1}) + 0.0422 \ln(100 \text{ m}) + \\
 &\quad + 0.1434 \ln(60) - 0.000631 (\ln(100 \text{ m}))^2 \ln(60) \\
 K_t &= 0.108 - 0.1144 + 0.194338189 + 0.58712909 - 0.054790477 \\
 K_t &= 0.720276714
 \end{aligned}$$

Ejemplo 5.6.2 Calcular el calor requerido para evaporar 8.8 milímetros de lámina acumulados es una hectárea, asumiendo un valor del calor latente de vaporización de $\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$?

$$\begin{aligned}
 \text{volumen} &= \text{area} * \text{lamina} = 10,000 \text{ m}^2 (0.0088 \text{ m}) = 88 \text{ m}^3 \\
 \text{masa} &= \text{volumen} * \text{densidad} = 88 \text{ m}^3 (1000 \text{ Kg m}^{-3}) = 88,000 \text{ Kg} \\
 \text{energía total requerida} &= \text{masa} * \text{calor latente de vaporización} = m \lambda = \\
 &= 88,000 \text{ Kg} (2.45 \text{ MJ Kg}^{-1}) = 215,600 \text{ MJ} \\
 \text{energía total requerida por m}^2 &= \frac{215,600 \text{ MJ}}{10,000 \text{ m}^2} = 21.56 \text{ MJ m}^{-2}
 \end{aligned}$$

"Mundo de lo prometido, agua. Todo es posible en el agua"
Pedro Salinas

Calendarización del riego



6

CAPITULO 6

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

6.1 INTRODUCCIÓN

La calendarización del riego involucra actividades de planeación y toma de decisiones en las que el administrador u operador de una zona de riego debe involucrarse antes y durante un ciclo agrícola. La información deseable que se requiere tener en forma oportuna y completa es: el pronóstico de los cambios probables en el contenido de humedad, el pronóstico de la fecha y lámina del próximo riego para cada una de las parcelas, la estimación cuantitativa de los efectos adversos en la calidad y cantidad del rendimiento al posponer o adelantar el riego, y por último los parámetros que permiten evaluar si los objetivos del riego fueron cumplidos después de que éste fue aplicado (ver **Figura 6.1**).

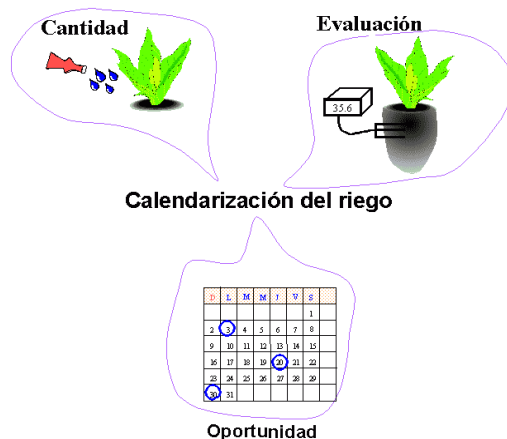


Figura 6.1 Componentes de la calendarización del riego.

La idea central de la calendarización del riego es estimar el cuánto y cuándo aplicar el riego a los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico. Para cumplir con esta tarea se debe tener una metodología para la determinación de: uso consuntivo de los cultivos, requerimientos estacionales de riego de los cultivos, la predicción de la tasa a la cual el contenido de humedad disminuirá en los próximos días sin la aplicación adicional de agua. Con la aparición de sensores confiables, de alta precisión y de lectura rápida, es posible evaluar si los objetivos de la calendarización del riego se cumplieron.

La calendarización del riego, esquemáticamente representada en la **Figura 1.3**, es el proceso de programación de los riegos de un cultivo para reponer el agua del suelo que se ha perdido (consuntivamente), antes de causar daño fisiológico debido al estrés hídrico. El proceso de calendarización del riego es una tarea compleja ya que involucra varios factores: la tasa consuntiva de los cultivos que varía hora a hora, la capacidad de retención y transmisión de agua en los suelos, el tipo y capacidad de los sistemas de suministro del riego y el tipo de sistema de aplicación del riego.

La calendarización del riego depende principalmente de la capacidad extractiva de los cultivos pero modificada por una gran variedad de factores de manejo. Por ejemplo, una hectárea de cítricos en su máxima demanda requiere alrededor de la mitad de agua de la demandada por una hectárea de alfalfa en su máxima demanda. Algunos cultivos como la papa son muy sensibles al estrés hídrico mientras que otros como el algodón pueden ser estresados en ciertas etapas fisiológicas para mejorar la calidad y cantidad del rendimiento. Láminas de riego pequeñas pueden propiciar eficiencias bajas en riego por gravedad o altas pérdidas por evaporación en riego por aspersión. Algunas zonas tales como los distritos de riego por gravedad del noroeste de México tienen políticas para el suministro del agua de riego. Por ejemplo, en el distrito de riego del Valle del Carrizo, Sinaloa, México, el agua puede solicitarse durante tres días de la semana (lunes, miércoles y viernes) y es entregada de 48 a 72 horas después que la solicitud es procesada. Otras veces el calendario de riego tiene que adaptarse a las prácticas de quimigación que cada día son más frecuentes. Algunas veces se tiene que aplicar un riego de presiembra para germinar y eliminar las malas hierbas antes de sembrar. En terrenos con superficie irregular regados por gravedad, se pueden presentar bajas eficiencias al aplicar láminas de riego pequeñas, por lo que resulta preferible la aplicación de láminas pesadas con el consiguiente incremento de amplitud de los intervalos entre cada riego para aumentar así la eficiencia de aplicación. Muchas veces no se tienen las condiciones de humedad propicias para el buen desarrollo de algunas actividades culturales como la cosecha, labranza, control de heladas, plagas y enfermedades, y aplicación de químicos. Estas prácticas de manejo tienen que ser consideradas durante la calendarización del riego para evitar el estrés hídrico de los cultivos.

La calendarización del riego depende de los siguientes factores:

1. Demandas hídricas de los cultivos.
 - Tipo de cultivo.
 - Etapa fenológica.
 - Condiciones climáticas.
 - Profundidad de las raíces.
2. Condiciones de la parcela de riego.
 - Longitud del surco o melga.
 - Pendiente.
 - Capacidad de infiltración del suelo.
 - Contenido de humedad del suelo
 - Distancia a la fuente de agua.

3. Sistema de riego.

- Capacidades mínimas y máximas del sistema.
- Aplicación de agroquímicos.
- Intensidad de aplicación.
- Capacidad del sistema de suministro.

4. Prácticas de manejo.

- Germinación de malas hierbas.
- Labores de labranza.
- Lavado de sales.
- Control de erosión.
- Modificación del régimen de temperaturas del suelo.
- Control de heladas, plagas y enfermedades.
- Rompimiento de costras.
- Control de la calidad y cantidad del rendimiento.

5. Factores humanos.

- Sistema administrativo de distribución del agua.
- Demandas de energía bajas.
- Días de descanso o festivos.

6. Efectos del clima.

- Vientos de alta velocidad.
- Temperaturas frías.
- Lluvia.
- Heladas.
- Ciclones.

7. Características fisicoquímicas de los insumos.

- Conductividad eléctrica.
- PH.
- Sólidos disueltos.

El éxito de la implantación de un programa de calendarización del riego al nivel de los agricultores depende de la información disponible sobre la zona de riego de interés. Salazar *et al.*, (1987) indicó que el éxito de un programa de calendarización de riego se debió a los pasos seguidos en su implantación:

- ✓ Entrevistas con los agricultores para conocer y documentar prácticas de manejo y producción.
- ✓ Inventario de los suelos, cultivos, fuentes de agua, etc.
- ✓ Evaluación de los sistemas de riego en relación con su capacidad, uniformidad, eficiencia potencial, edad, flexibilidad, costos de operación y problemas potenciales.

- ✓ Calendarización del riego usando un sistema informático basado en el método del balance hídrico, con verificación en campo del calendario calculado usando métodos vegetales visuales, tacto, y tensiómetros. Los calendarios son actualizados una o dos veces por semana dependiendo del cultivo y tipo de servicio contratado. Los agricultores pueden conectarse a la computadora de la compañía consultora para obtener información sobre las fechas, tiempos y campos a regar.
- ✓ Realizar un seguimiento del desarrollo de los cultivos, patrones de riegos y suelos usando fotografías aéreas, infrarrojas y a color. Las observaciones hechas son usadas para determinar puntos de muestreo, identificar problemas en los sistemas y afinar prácticas de manejo.
- ✓ Resumir y discutir el programa de calendarización propuesto con el agricultor varias veces durante y después del ciclo agrícola. Al final del ciclo se comparan los resultados obtenidos en aquellas parcelas cuyos riegos fueron calendarizados científicamente, respecto de aquellos obtenidos en los campos sin seguimiento. Se hacen recomendaciones para mejorar la programación del riego en el siguiente ciclo.

Aunque existen varios métodos para calendarizar el riego en forma racional, en esta sección se discutirá con detalle el método del balance hídrico. Dicho método es usado extensivamente en varias partes del mundo para calendarizar el riego en grandes zonas de riego con buenos resultados.

6.2 MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO

Uno de los deseos que siempre han añorado los agricultores es encontrar una receta mágica que les permita predecir el contenido de humedad del suelo sin la necesidad de un muestreo intensivo. Lo anterior es posible si se realiza un balance riguroso de los componentes relacionados con el cambio en el contenido de humedad.

Tradicionalmente los sistemas se han operado con base en el contenido de humedad presente en el suelo, de tal manera que la calendarización del riego se concentra en entender y realizar un balance de humedad en la zona de raíces.

El contenido de humedad del suelo puede ser determinado en un intervalo de tiempo, usualmente un día, usando la siguiente ecuación de balance de humedad que es meramente una aplicación de la ley de conservación de materia que establece que la materia no puede ser creada o destruida, solo cambia de estado o posición:

$$\Delta V = V_{entra} - V_{sale} \quad (6.1)$$

Donde ΔV es el cambio en el volumen de agua almacenada en la zona de las raíces.

Si el volumen de entrada es mayor al de salida el valor de ΔV es positivo por lo que hay ganancia, en caso contrario hay pérdidas de humedad en la zona radical. Si se

asume un volumen con área unitaria, se puede describir los cambios de volumen en forma unidimensional. Al tomar en cuenta cada uno de los componentes de las entradas y salidas potenciales de la zona de las raíces y despreciando el escurrimiento subsuperficial, en términos unidimensionales, se tiene:

$$\Delta H = \text{entradas} - \text{salidas} = (P + R + A_c) - (ET + PP + E_s) \quad (6.2)$$

Donde ΔH es el cambio de humedad en términos de lámina de riego, P la precipitación, R el riego aplicado, A_c el ascenso capilar del manto freático a la zona de raíces, ET la evapotranspiración de los cultivos, PP la percolación, E_s el escurrimiento superficial y E_{ss} es el escurrimiento subsuperficial. La **Figura 6.2** muestra gráficamente cada uno de los componentes que intervienen en el balance del agua en la zona de raíces.

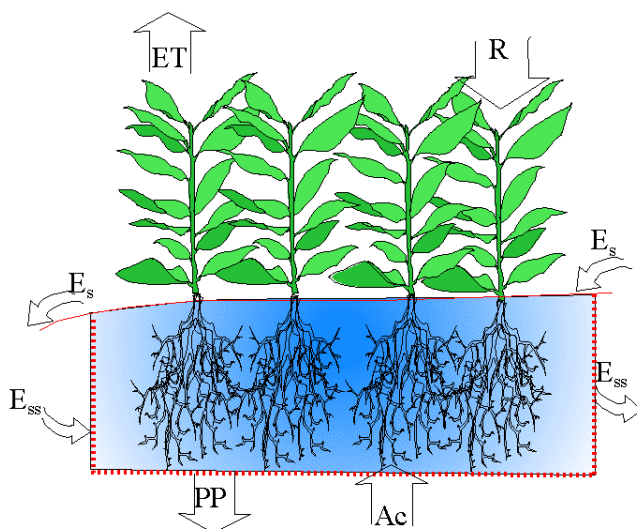


Figura 6.2 Componentes que intervienen en el balance de agua en la zona de raíces.

Por simplicidad en grandes zonas de riego con mantos freáticos profundos se deprecia el escurrimiento superficial y el ascenso capilar.

Para poder usar el método del balance hídrico en la calendarización del riego, primero se define el intervalo de tiempo, pudiendo ser horario, diario, mensual, etc. Si el cambio en el contenido de humedad ΔH , en términos de lámina, es determinado con intervalos diarios, su valor puede estimarse como la diferencia entre los contenidos de humedad al final de los días $i-1$ y i , (H_{i-1} y H_i).

$$\Delta H = H_i - H_{i-1} \quad (6.3)$$

De esta manera para predecir el contenido de humedad al final del día i (H_i), expresado en lámina, se usa la siguiente ecuación:

$$H_i = H_{i-1} + P_{e-i} + R_i - ET_i - PP_i \quad (6.4)$$

Donde P_{e-i} es la precipitación efectiva en mm que ocurrió en el día i , R_i es el riego aplicado (mm) en el día i , ET_i es la evapotranspiración del cultivo (mm) para el día i , PP_i es la cantidad de agua en mm que se percola fuera de la zona de raíces durante el día i . Para expresar el contenido de humedad de lámina a humedad volumétrica se requiere conocer la profundidad radical (ver sección 3.1.10).

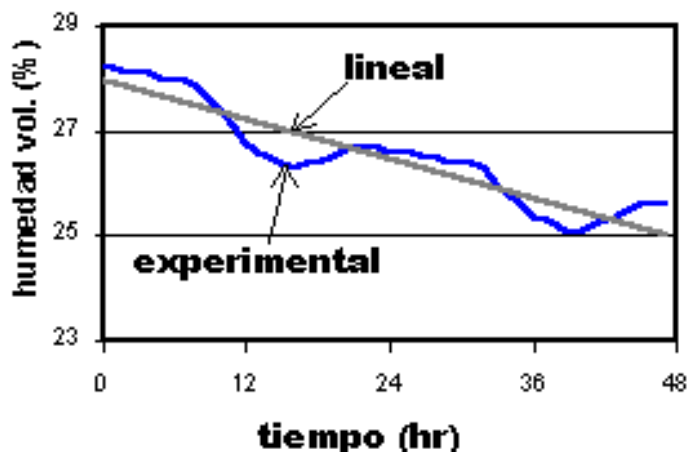


Figura 6.3 Variación horaria de la humedad en el estrato superior de un suelo cultivado.

La ecuación de balance asume que los cambios de humedad son lineales para el periodo de análisis i , sin embargo, en la realidad los cambios son no lineales como lo muestra la **Figura 6.3** que muestra el contenido de humedad (θ_v) en el estrato superior de 30 cm por un periodo de dos días (48 hrs). Se observa una alta variabilidad del contenido de humedad en el estrato superior. Por la mañana existe un movimiento ascendente de humedad proveniente de los estratos inferiores, mientras que al mediodía existe un decremento de humedad en el estrato superior producido por la alta demanda evapotranspirativa atmosférica y la limitada capacidad del suelo para suministrar humedad de estratos superiores. Los agricultores llaman a este fenómeno “revenimiento del suelo” evitando realizar algunas labores culturales con maquinaria muy temprano o muy tarde (Hernández, 2001). Para propósitos prácticos, la aproximación lineal del contenido de humedad produce una calendarización del riego consistente y precisa.

La mayoría de los paquetes computacionales desarrollados para calendarizar el riego usan la **ecuación (6.4)**. Parten de un valor del contenido de humedad inicial (H_i), medido directamente en el terreno o estimado, y actualizan el contenido al finalizar cada intervalo de tiempo, generalmente diario, usando valores o estimaciones de la precipitación, riego, evapotranspiración, percolación que ocurrieron en dicho intervalo de tiempo. Los riegos se calendarizan para cuando el déficit de humedad disminuye a un valor crítico (H_c) previamente definido según el tipo de cultivo y suelo.

Para poder aplicar la ecuación del balance hídrico se requiere tener estimaciones de algunos parámetros del suelo los cuales son específicos de cada sitio. La mayoría de estos parámetros deben estimarse en el campo o en el laboratorio. Algunos pueden estimarse indirectamente usando parámetros básicos del suelo.

La exactitud del método del balance hídrico depende de la magnitud de los siguientes errores potenciales:

- ✓ Limitaciones en la metodología para evaluar la evapotranspiración real del cultivo: ecuaciones para predecir ET_o inexactas, coeficientes de cultivo y desarrollo radical inexactos, etc.
- ✓ Errores en la instrumentación meteorológica.
- ✓ Heterogeneidad en la lluvia en el cultivo bajo análisis.
- ✓ Inexactitud en la medición de la lluvia y riego aplicado.
- ✓ Problemas para estimar la lluvia efectiva.
- ✓ Errores en la estimación del valor inicial del contenido de humedad (H_0).

En un lisímetro, la evapotranspiración puede ser estimada realizando muestreos frecuentes de la humedad del suelo y rescribiendo la **ecuación (6.4)** de la siguiente manera:

$$ET_i = P_{e-i} + R_i - PP_i - (H_i - H_{i-1}) \quad (6.5)$$

Otra alternativa para calendarizar el riego es usar el déficit de humedad (D_i) como indicador de riego. El déficit de humedad se define como la lámina de riego requerida para alcanzar el nivel de humedad deseable, usualmente dada por el contenido a capacidad de campo. Realizando un balance de humedad en la zona radical, es posible estimar el déficit de humedad actual (D_i) al final de un periodo i si se conocen la magnitud de los flujos que ocurren en la frontera de la zona radical durante el periodo de tiempo.

$$D_i = D_{i-1} + (ET_i + PP_i - P_{e-i} - R_i) \quad (6.6)$$

Donde:

D_{i-1} : es el déficit de humedad al final del periodo de tiempo $i - 1$.

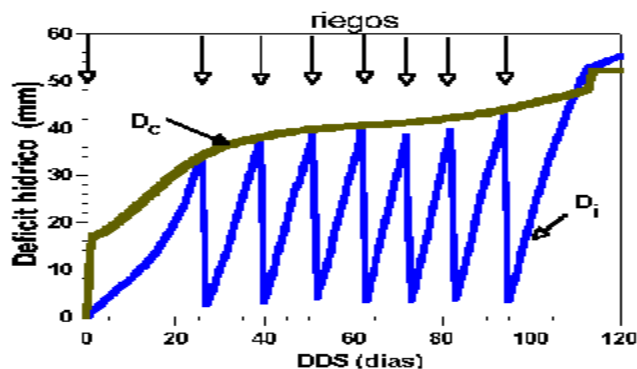


Figura 6.4 Variación del déficit de humedad durante el ciclo fenológico del cultivo en Días Después de Siembra (DDS).

El riego es aplicado cuando el déficit actual sea igual al déficit crítico:

$$D_i \approx D_{c-i} \leq DT_i \quad (6.7)$$

Donde:

DT: es el déficit de humedad total o humedad aprovechable en la zona radical para el periodo i .

El déficit crítico (D_{c-i}) para el periodo i se define como el límite a partir del cual el rendimiento es afectado por la ocurrencia de estrés hídrico. Dicho valor es dinámico durante el ciclo fenológico del cultivo y puede ser estimado con la siguiente relación:

$$D_{c-i} = f_i DT_i \quad (6.8)$$

Donde:

f_i : es el factor del máximo abatimiento hídrico permisible para el día i que depende principalmente del tipo y etapa fenológica del cultivo (ver capítulo 3).

Un día es usualmente el periodo de tiempo usado para realizar los cálculos asociados al método del balance hídrico. La **Figura 6.4** muestra la variación diaria típica del déficit actual (D_i) a lo largo del ciclo fenológico para el cultivo de papa regado por gravedad. Se muestra como referencia los valores del déficit crítico (D_c). El riego es aplicado cuando el valor de D_i se aproxima a D_c . Los valores de D_c varían dependiendo de los valores del factor de abatimiento (f) y profundidad radical.

Uno de los problemas en calendarizar el riego usando el método del balance hídrico es la disponibilidad de los coeficientes de calendarización (profundidad radical, factor de abatimiento y coeficiente de cultivo) que definen la zona extractiva de la zona radical, la sensibilidad al estrés y la capacidad evapotranspirativa de los cultivos.

A continuación se discute en detalle cada uno de los términos asociados con los cálculos para realizar la calendarización del riego usando el método del balance hídrico.

6.3 PROFUNDIDAD DE RAÍCES (P_r)

La extracción de agua por las raíces es crítica para el desarrollo de un cultivo. El flujo extractivo de las raíces responde al flujo transpirativo de las hojas. Ante una disminución en la reserva hídrica del suelo, los estomas se cierran, pudiendo afectar irreversiblemente el desarrollo normal de un cultivo que finalmente puede resultar en una disminución de su rendimiento.

Varios factores condicionan la distribución radical de un cultivo, entre los que destacan los siguientes:

- Tipo de cultivo.
- Condiciones hídricas del suelo (patrón de mojado y contenido de humedad).
- Compactación del suelo.
- Textura del suelo.
- Temperaturas extremas en el suelo.
- Limitado suministro de oxígeno.
- Densidad de siembra.
- Estado sanitario del cultivo.
- Alto contenido de aluminio por bajo pH .
- Baja fertilidad del suelo.
- Presencia de materiales fitotóxicos bajo condiciones anaeróbicas.

Las plantas extraen el agua que se encuentra en el área de influencia de las raíces, principalmente por los pelos radicales (**Figura 6.5**). Las plantas con un sistema radical denso como los pastos pueden absorber la mayor parte de la humedad disponible, mientras que cultivos con limitada densidad radical como las hortalizas dependen en su mayor parte de las propiedades hidrodinámicas del suelo para transportar agua de la zona de oferta a la zona de demanda.



Figura 6.5 Componentes que intervienen en la extracción de agua realizada por las raíces.

El uso del método del balance hídrico requiere del conocimiento de la profundidad radical dinámica. El objetivo del riego es mantener a la zona radical en condiciones óptimas de humedad.

A medida que la planta se desarrolla, la zona radical también crece hasta alcanzar un tamaño máximo. Típicamente la zona radical se extiende tanto lateral como verticalmente. El desarrollo radical se restringe por factores ambientales, fisiológicos y genéticos como pueden ser: la invasión de zonas radicales vecinas, la presencia de zonas compactadas, ensalitradas¹, anegadas, ácidas o alcalinas, anaeróbicas e inhibitorias del crecimiento. La profundidad de la zona radical debe ser determinada en el campo para los cultivos de interés con alto grado de confiabilidad. A falta de estos datos, existen varias tablas de datos publicadas para la mayoría de los cultivos comerciales, aunque pueden ser difíciles de extrapolar a condiciones particulares ya que estas condiciones pueden ser completamente diferentes a las consideradas para obtener los valores de las tablas.

Una planta anual puede desarrollar un sistema radical denso de varios metros por cm^3 de suelo para explorar el suelo en busca de humedad. La **Tabla 6.1** muestra que el diámetro de las raíces de trigo y cebada varían de 0.05 cm para la raíz principal y de 0.001 cm para los pelos radicales, con una densidad de 1 cm de raíces principales y de 1000 cm de pelos radicales por cm^3 de suelo (Wild, 1993). Esa extensa red de absorción debe suministrar continuamente agua y sales a la planta en un medio escaso, diluido, y en competencia con otros organismos del suelo. La densidad de raíces, la longitud efectiva de raíces por unidad de volumen, es uno de los principales factores relacionados con la tasa de absorción de agua por medio de las raíces.

Tabla 6.1 Densidad radical de cebada y trigo para diferentes tipos de raíces (Wild, 1993).

¹ En México se usa el término ensalitramiento para indicar que el suelo ha sufrido un proceso de degradación inducida por acumulación de sales disueltas en el agua de riego.

Diámetro	Eje principal	Lateral de 2º orden	Lateral de 3º orden	Pelos Radicales
	0.05	0.02	0.01	0.001
No. de raíces del siguiente nivel superior por cm.	-	2	1	1000
Longitud de raíces (cm) por cm ³ de suelo.	1	5	2	1000

El balance de humedad tiene que realizarse dentro de la sección de control dada por el volumen de raíces, por lo que se debe tener un estimador del crecimiento dinámico de la zona radical. A medida que las raíces crecen también crece la sección de control. Típicamente se asume que las raíces de cultivos anuales inician su desarrollo después de la siembra a una profundidad un poco mayor a la profundidad de siembra o trasplante. Durante la germinación los requerimientos de riego son bajos y utilizados en generar la humedad óptima alrededor de la semilla. La profundidad de la sección de control esta delimitada por la profundidad efectiva radical que puede tomarse como la profundidad donde se tiene el 90% del sistema radical que corresponde al 75% del total de la profundidad máxima y donde se absorbe alrededor de 90% de la humedad del suelo. **La Figura 6.6** indica que el 40% de la absorción de agua por las raíces se presenta en la cuarta parte superior de la zona radical.

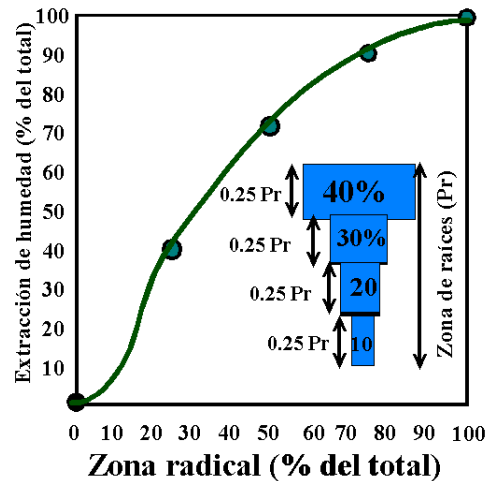


Figura 6.6 Patrón típico de extracción de humedad realizada por las raíces.

Se puede asumir que la profundidad radical aumenta linealmente hasta alcanzar una profundidad máxima con un volumen de exploración mas o menos constante.

La mayoría de los modelos de crecimiento de raíces asumen un crecimiento lineal, iniciando a la profundidad de siembra y terminando a una profundidad máxima donde la mayor parte de la absorción del agua por las raíces se presenta. **La Figura 6.7** ilustra el crecimiento radical lineal a lo largo del ciclo fenológico usado en el cultivo

de la papa en el Valle de San Luis del Estado de Colorado, EE.UU. (Salazar et al., 1996).

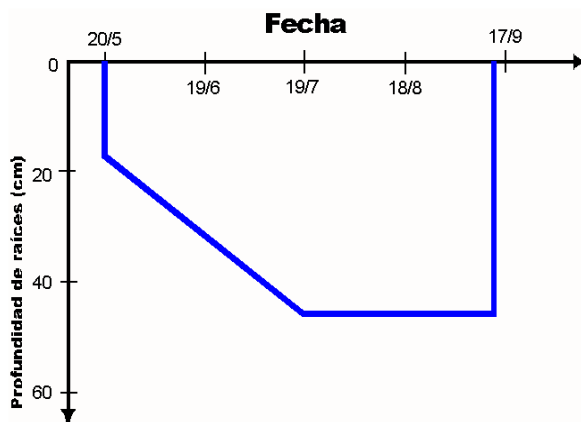


Figura 6.7 Crecimiento radical lineal de la papa.

Fereres et al., (1981) propusieron el siguiente modelo lineal para estimar la profundidad radical:

$$P_r = P_o + (P_{max} - P_o) \frac{t}{t_{max}}$$

$$P_r = P_{max}, \quad t > t_{max} \quad (6.9)$$

Donde:

t : es el tiempo después de siembra (T).

t_{max} : es el tiempo en llegar a la profundidad radical máxima (T).

P_{max} : es la profundidad máxima radical (L).

P_o : es la profundidad de siembra (L).

La relación t/t_{max} define el desarrollo vegetativo (D_v) de un cultivo en el rango 0 a 1. Cuando D_v es máximo se ha alcanzado la máxima profundidad.

Existen otros modelos algebraicos que describen el comportamiento de la profundidad radical en función de parámetros generalmente empíricos. Palacios y Martínez (1978) propusieron el siguiente modelo para estimar la profundidad radical dinámica, (P_r):

$$P_r = \frac{\frac{t}{t_{max}}}{W + (1-W) \frac{t}{t_{max}}} P_{max} \quad (6.10)$$

$$P_r = P_{max}, \quad t > t_{max}$$

Donde:

W: es un parámetro que depende del tipo de crecimiento radical del cultivo.

Un valor W de cero indicaría un valor constante y un valor de uno indicaría una relación lineal, $P_r = D_v P_{max}$. La **Figura 6.8** describe la variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo (D_v) para cuatro valores de W (0.1, 0.5, 1 y 2).

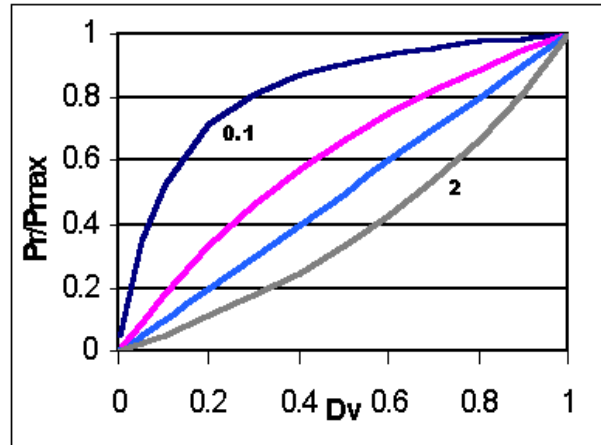


Figura 6.8 Variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo para cuatro valores (0.1, 0.5, 1 y 2) del parámetro W de la ecuación (6.10).

El siguiente modelo lineal permite estimar la profundidad radical dinámica (P_r) usando una estimación del coeficiente de cultivo (K_c):

$$P_r = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \frac{K_c(t)}{K_{\max}} \quad \text{para } t \leq t(K_m) \quad (6.11)$$

$$P_r = P_{\min}, \quad \text{para } t \geq t(K_m)$$

Donde:

P_{\min} : es la profundidad radical mínima o de siembra.

P_{\max} : es la profundidad radical máxima.

$K_c(t)$: es el valor del coeficiente de cultivo a un tiempo t.

K_{\max} : es el valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c).

Un modelo más complejo para estimar la profundidad radical fue propuesto por Hanks y Hill (1980):

$$P_r = \frac{P_o + (P_{\max} - P_o)}{1 - \exp\left[\alpha_o - \alpha_1 \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)\right]}, \quad \text{para } t \leq t_{\max} \quad (6.12)$$

$$P_r = P_{\min}, \quad \text{para } t > t_{\max}$$

Donde α_0 y α_1 son parámetros empíricos obtenidos por regresión.

Una de las prácticas más comunes en algunas regiones agrícolas es retrasar el riego para forzar la penetración de raíces y desarrollar un sistema radical profundo. La **Figura 6.9** muestra la densidad radical en función de la profundidad y el intervalo de riego para varios cultivos. Se observa una marcada disminución en la densidad radical en el estrato superior a expensas del crecimiento radical en estratos profundos a medida que el intervalo de riego se incrementa. Lo cual indica que el cultivo genera biomasa radical a expensas del rendimiento localizado en otros órganos vegetales.

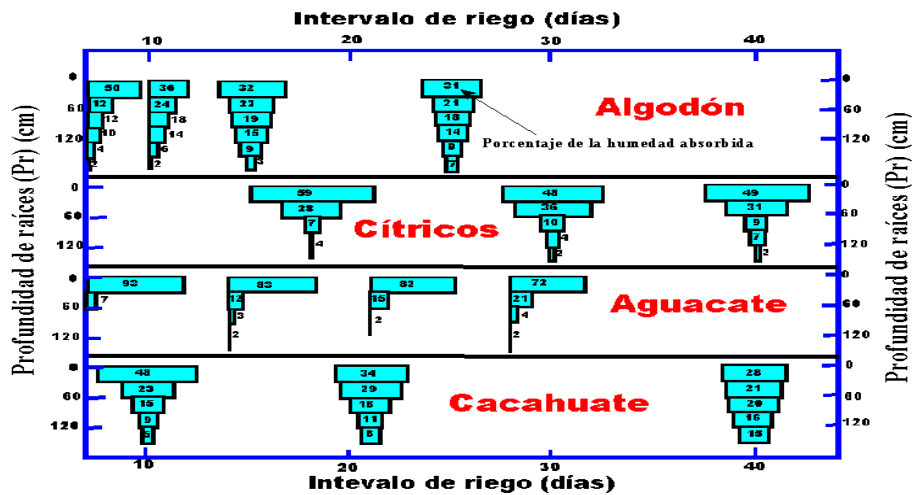


Figura 6.9 Desarrollo radical en función de la frecuencia de riego (Lomas y Levin, 1978).

Borg y Grimes (1986), propusieron el siguiente modelo para estimar la profundidad radical:

$$P_r = P_{\max} (0.511 + 0.511 \operatorname{sen}_{rad} (3.03 \frac{t}{t_{\max}} - 1.47)), t \leq t_{\max} \quad (6.13)$$

$$P_r = P_{\max}, \quad t > t_{\max}$$

La forma y el tamaño de la zona radical son dinámicos en tiempo y espacio dependiendo de la especie y etapa fenológica, sin embargo su desarrollo típico puede ser afectado por las condiciones físico-químicas de la zona radical. La **Tabla 6.2** muestra las profundidades de raíces efectivas de los principales cultivos, donde se presenta del 80-90% de la extracción del agua. La profundidad de exploración efectiva de las raíces es una característica de cada especie cuando las condiciones de porosidad, humedad y nutricionales no son limitantes.

Tabla 6.2 Profundidad efectiva aproximada de los principales cultivos agrícolas (FAO, 1990).

Cultivos de raíces poco profundas (30-60 cm).	Crucíferas (repollo, coliflor, etc.), apio, lechuga, cebolla, papa, espinaca y otras hortalizas excepto remolachas, zanahoria, y calabaza.
Cultivos de raíces de profundidad media (50-100 cm).	Plátano, frijol, remolachas, zanahorias, trébol, cacao, calabaza, cacahuate, palmeras, arvejas, o guisantes, pimientos, soya, remolacha azucarera, girasol, tabaco, tomates.
Cultivos de raíces profundas (90-150 cm).	Alfalfa, cebada, cítricos, algodón, dátiles, frutales de hojas caducas, lino, vid, maíz, melón, avena, olivo, cártamo, sorgo, caña de azúcar, trigo.

Existen cultivos particulares como la alfalfa y caña de azúcar que mantienen un sistema de raíces casi constante por varios ciclos. Otros cultivos como la lechuga y papa desarrollan sistemas radicales someros concentrados en los 50 cm superiores. Especies como el cilantro, perejil, espinacas y cebollas concentran sus raíces en los 30 cm superiores. En cuanto a la forma también existe una variación entre especies. Las raíces de las cucurbitáceas, por ejemplo, se pueden extender lateralmente hasta distancias de 2 m, mientras que en el espárrago las raíces se extienden hasta profundidades de 2 m pero con poco desarrollo lateral. A mayor profundidad de raíces mayor es su volumen de exploración y por lo tanto mayor es su capacidad de sobrevivencia en periodos de sequía.

La **Tabla 6.3** muestra la máxima penetración de las raíces de varios cultivos de acuerdo a la textura del suelo. La **Tabla 6.3** es sólo un indicador de la profundidad máxima de las raíces en función de la textura y no pretende sustituir los valores presentes en el campo.

Tabla 6.3 Profundidad efectiva de exploración de las raíces (cm) de acuerdo a la textura del suelo (Palacios, 1998).

CULTIVO	TEXTURA		
	LIGERA	MEDIA	PESADA
Algodón	120	90	78
Cacahuate	80	60	50
Calabazas	100	75	60
Cebada	100	75	60
Cebolla	50	40	35
Col	90	60	50
Espárrago	250	170	130
Fresa	110	85	70
Frijol	100	75	60
Jitomate	110	85	70
Lechuga	50	40	30
Maíz	120	90	75
Melón	130	100	70
Papa	120	90	75

CULTIVO	TEXTURA		
	LIGERA	MEDIA	PESADA
Pepino	90	60	50
Sorgo	100	75	60
Soya	100	75	60
Tabaco	120	90	75
Trigo	100	75	60
Alfalfa	250	180	150
Caña de azúcar	110	85	70
Cítricos	180	140	110
Frutales (caducos)	240	180	160
Frutales (perennes)	260	200	170
Nogal	300	250	220
Pastos	110	80	65
Vid	120	90	75

Existen varios criterios para determinar la profundidad radical efectiva para un determinado suelo, el criterio común es usar el impedimento mecánico del suelo al crecimiento de las raíces. Estudios realizados por varios investigadores indican que para varias especies vegetales cultivadas, la penetración de raíces en los suelos se detiene cuando los valores de resistencia de los suelos al penetrómetro es de 20 a 30 bar, lo cual da una idea de la profundidad del suelo explorable cuando se dispone de este tipo de información. En el campo, la presencia de lecho rocoso, capas endurecidas de tepetate o la discontinuidad en la presencia de raíces también pueden ser indicadores de la profundidad del suelo. El crecimiento de raíces también puede verse impedido por mantos freáticos elevados, por estratos de suelo compactos y saturados de humedad o por estratos de arena gruesa o grava.

La **Figura 6.10** ejemplifica datos de la profundidad dinámica en función del porcentaje de desarrollo para un cultivo (maíz) obtenidos experimentalmente en el Carrizo Sinaloa, México. Se observa que a mitad del ciclo se alcanza la profundidad máxima de crecimiento radical. La **Figura 6.11** muestra las diferentes etapas en la germinación de una planta dicotiledónea.

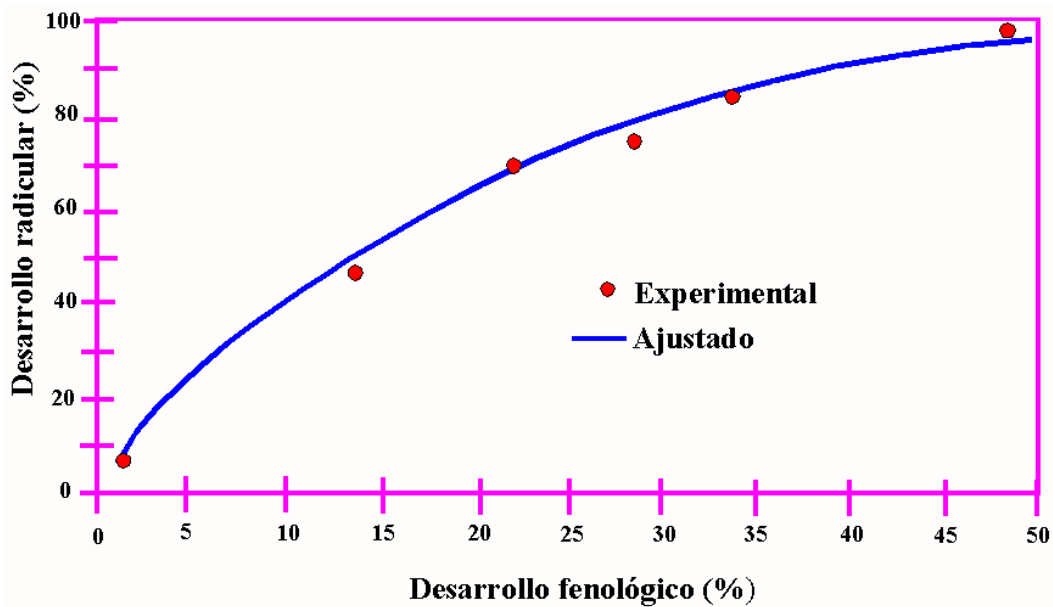


Figura 6.10 Desarrollo radical en función del porcentaje de desarrollo para el maíz.

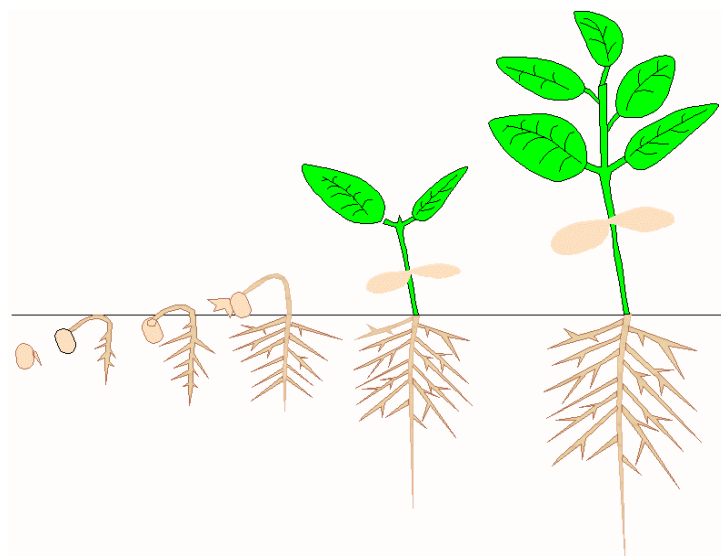


Figura 6.11 Estados en la emergencia de una planta dicotiledónea (Merva, 1995).

La presencia de un estrato endurecido o un suelo poco profundo afecta radicalmente el desarrollo potencial de las raíces. La profundidad máxima del suelo ($P_{r_{max}}$) es la profundidad de material poroso favorable para la penetración de las raíces. Los suelos favorables para la producción agrícola son profundos, con buen drenaje, textura y estructura. La profundidad máxima de raíces (P_{max}) puede ser limitada por barreras físicas o químicas así como por la presencia de mantos freáticos someros. La **Tabla 6.4** muestra la productividad del suelo en función de su profundidad de acuerdo al Potash and Phosphate Institute (1994).

Tabla 6.4 Influencia de la profundidad máxima del suelo en la productividad (PPI, 1994).

Profundidad del suelo utilizable por las raíces (cm)	Productividad relativa (%)
30	35
60	60
90	75
120	85
150	95
180	100

Como la capacidad de retención de agua de los suelos es variable con el tipo de suelo, es necesario realizar el balance de humedad por estratos.

6.4 PRECIPITACIÓN EFECTIVA (P_e)

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación que se almacena en la zona de raíces, la cual no incluye el agua percolada, interceptada, escurrida o evaporada que al precipitarse no se acumula en la zona radical. Su estimación ha estado sujeta a una diversidad de estudios, sin embargo debido a su complejidad en su estimación sólo han sido de utilidad algunas relaciones empíricas, la mayoría validas para periodos de un mes y de poca utilidad para periodos cortos o eventos de precipitación. La estimación en campo de la precipitación efectiva es difícil por las prácticas cambiantes de manejo y por los costos en estimar el contenido de humedad (antes y después de una lluvia), la intensidad y duración de la lluvia, la velocidad de infiltración, y las características superficiales del suelo.

Cahoon *et al.*, (1990) encontraron que lluvias menores de 5.1 mm resultaron inefectivas en reducir el déficit de humedad del suelo después de analizar datos de varios años del estado de Arkansas.

Una calendarización de riego óptima debe considerar la posible lluvia con alta probabilidad de presentarse durante el intervalo de riego posterior al riego. En este caso no es necesario llevar el suelo a capacidad de campo sino a un valor menor que considere la lámina de riego suministrable por la posible lluvia.

La ecuación general para evaluar la precipitación efectiva tiene la forma siguiente:

$$P_e = K_p P \quad (6.14)$$

Donde: K_p , es un factor de ajuste; P , es la precipitación observada.

Ogrosky y Mockus (1964) presentaron un método de estimación del coeficiente K_p para evaluar la precipitación efectiva con la siguiente forma:

$$\frac{1}{K_p} = 1.53 \frac{P}{ET_r} + 0.8 \quad (6.15)$$

Donde:

P : es la precipitación observada (L).

ET_r : es la evapotranspiración real acumulada (L) desde el último evento de precipitación o riego.

Ejemplo. Si se tiene que la evapotranspiración real de un cultivo desde la última precipitación es de 30 mm y la precipitación observada es de 10 mm, el factor K_p es de 0.763 y $P_e = 7.63$ mm.

Existen otras formas para evaluar la precipitación efectiva:

$$P_e = K_1 + K_2 P \quad (6.16)$$

Donde P es la precipitación observada, K_1 y K_2 son coeficientes que dependen de la magnitud de la lluvia. Por ejemplo para climas áridos y subhúmedos se recomiendan valores de $K_1 = -10$ y $K_2 = 0.6$ para valores de $P < 70$ mm, valores de $K_1 = -24$ y $K_2 = 0.8$ para valores de $P > 70$ mm. Estos coeficientes K_1 y K_2 fueron obtenidos analizando estadísticas de lluvias.

Existe otro método conocido como SCS que aunque fue desarrollado para cuencas hidrológicas puede utilizarse para estimar la precipitación efectiva durante el ciclo agrícola de un cultivo. El escurrimiento superficial puede estimarse con la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (6.17)$$

Donde:

E_s : es el escurrimiento superficial.

I_a : es la abstracción inicial que define el agua precipitada interceptada por el follaje del cultivo, el agua infiltrada y el agua almacenada antes que el escurrimiento se presente.

S : es la abstracción potencial máxima de una lluvia (P) en mm que se estima con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6.18)$$

Donde:

CN, es el número de curva para un contenido de humedad antecedente (CHA) previo a la lluvia tipo II (CHA_{II}). La **Tabla 6.5** define los números de curva para diferentes tipos de coberturas y condiciones hidrológicas asumiendo una humedad tipo CHA_{II} . La **Tabla 6.6** presenta las características de los suelos que definen los diferentes grupos hidrológicos usados en la **Tabla 6.5**. La **Tabla 6.7** presenta las

condiciones que describen cada uno de los tres tipos de condición de contenido de humedad antecedente (CHA).

Para una condición de humedad tipo I se usa la siguiente ecuación para cambiar la curva dada por la **Tabla 6.5** para CHA_I:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.305 - 0.01305 CN_{II}} \quad (6.19)$$

Para una condición de humedad tipo III se usa la siguiente ecuación para cambiar la curva dada por la **Tabla 6.5**:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 - 0.0057 CN_{II}} \quad (6.20)$$

La precipitación efectiva, almacenada en la zona de raíces, puede estimarse con la siguiente expresión, si se asume que la mayor parte de la abstracción inicial se infiltra:

$$\begin{aligned} P_e &= S - PP, \text{ si } S \geq D_t \\ P_e &= S, \text{ si } S < D_t \end{aligned} \quad (6.21)$$

Donde:

PP: es la percolación profunda.

D_t: es déficit total de humedad.

S: es la abstracción máxima potencial de una lluvia.

Para estimar los componentes de la precipitación se usan las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0.2S \\ L_i &= 0.8S \end{aligned} \quad (6.22)$$

Substituyendo el estimador de I_a en la ecuación 6.17 Se obtiene una nueva relación simplificada para estimar el escurrimiento superficial:

$$E_s = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (6.23)$$

Tabla 6.5 Número de curva (CN_{II}) de escurrimiento para diferentes complejos hidrológicos suelo-cobertura para un contenido de humedad antecedente tipo II y $I_a = 0.2S$.

Uso de suelo o cobertura	Cobertura		Grupo de suelo hidrológico			
	Práctica de manejo	Condición hidrológica	A	B	C	D
Barbecho	HR	-	77	86	91	94
Cultivos en hilera	HR	P	72	81	88	91
	HR	B	67	78	85	89
	C	P	70	79	84	88
	C	B	65	75	82	86
	CT	P	66	74	80	82
	CT	B	62	71	78	81
Granos pequeños	HR	P	65	76	84	88
	C	P	63	74	82	85
	C	B	61	73	81	84
	CT	P	61	72	79	82
	CT	B	59	70	78	81
Legumbres con alta densidad	HR	P	66	77	85	89
	HR	B	58	72	81	85
	C	P	64	75	83	85
	CT	B	55	69	78	83
	CT	P	63	73	80	83
		B	51	67	76	80
Pradera	-	-	30	58	71	78

Nota: Tipo de manejo: HR-Hileras rectas, C-contorno, CT-contorno y terraceado, condición hidrológica: P-pobre, B-buena.

Los pasos requeridos para obtener el escurrimiento (E_s) y la precipitación efectiva (P_e) usando el método del SCS son:

1. Clasificar el suelo de acuerdo a su uso y cobertura.
2. Clasificar el suelo de acuerdo a su práctica de manejo y condición hidrológica.
3. Clasificar el suelo de acuerdo a su grupo hidrológico (**Tabla 6.6**).
4. Obtener el número de curva (CN) de la **Tabla 6.5** asumiendo contenido de humedad antecedente tipo II (CHA_{II}).
5. Clasificar el suelo de acuerdo a su contenido de humedad antecedente actual CHA_a (**Tabla 6.7**).
6. Ajustar el número de curva (CN) en caso de que el $CHA \neq CHA_{II}$. Para condición CHA_I usar **ecuación (6.19)** y para CHA_{III} usar **ecuación (6.20)**.
7. Obtener la abstracción total (S) en mm usando la **ecuación (6.18)**.
8. Estimar el escurrimiento usando **ecuación (6.23)**.
9. Estimar el déficit de humedad en la zona radical.
10. Estimar la precipitación efectiva P_e con **ecuación (6.21)**.

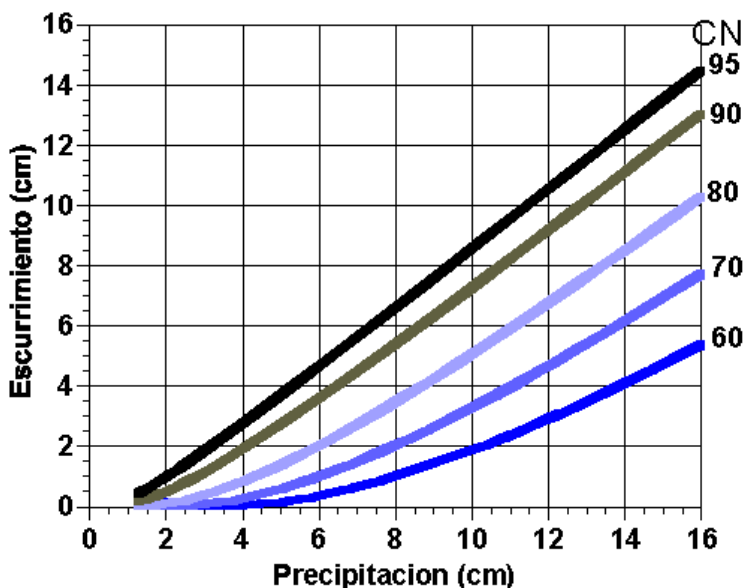


Figura 6.12 Variación del escurrimiento (E_s) en función de la precipitación y el número de curva.

La Figura 6.12 describe la variación del escurrimiento superficial (E_s) para diferentes magnitudes de lluvia y números de curva (CN). Se observa una disminución en el escurrimiento a medida que CN disminuye.

Tabla 6.6 Grupos de suelos hidrológicos.

Tipo	Características del suelo
A	Alta velocidad de infiltración, aún bajo condiciones húmedas
B	Infiltración moderada bajo condiciones húmedas
C	Baja velocidad de infiltración bajo condiciones húmedas
D	Baja infiltración bajo condiciones húmedas, arcillas expansivas o con un estrato impermeable

Tabla 6.7 Tipos de contenidos de humedad antecedente previa (CHA).

Tipo de Contenido Humedad Antecedente (CHA)	Total lluvia antecedente en los cinco días previos		Condición
	Sin cultivo	Con cultivo	
I	< 13 mm	< 35 mm	Bajo potencial de escurrimiento. Condiciones secas.
II	13 - 28 mm	35 - 53 mm	Condición promedio.
III	> 28 mm	> 53 mm	Alto potencial de escurrimiento. Suelos prácticamente saturados de lluvias previas.

6.5 ASCENSO CAPILAR (A_c)

Un porcentaje de los requerimientos hídricos de los cultivos puede ser aportados por el ascenso de agua de mantos freáticos someros. El porcentaje de aportación depende de los siguientes factores:

- Profundidad de la zona de raíces.
- Profundidad del manto freático.
- Propiedades fisicoquímicas del agua freática.
- Textura y estructura del perfil del suelo.
- Cantidad y frecuencia del riego.

En un experimento con lisímetros para estimar las aportaciones del ascenso capilar a los requerimientos de riego en algodón (Ayars y Hutmacher, 1994) se encontró que a medida que la salinidad del agua se incrementa, la aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos de la planta disminuye. El mismo efecto se presenta con la profundidad del manto freático. La **Figura 6.13** muestra los cambios de las aportaciones freáticas a los requerimientos para dos profundidades (1.2 y 2 m) con una calidad de agua de 7.7 dS/m. Se observa que cerca del 50% de los requerimientos hídricos de los cultivos son aportados por ascenso capilar de un manto freático a 1.2 m de profundidad cuando el cultivo se encuentra a su máxima capacidad evapotranspirativa, cuando la profundidad cambia a 2 m la aportación disminuye al 35%. El valor de K_{cb} en el eje de las ordenadas de la **Figura 6.13** son para un cultivo sin aportaciones significativas de un manto freático. Ayars y Hutmacher (1994) disminuyeron en 10 cm las láminas netas aplicadas convencionales (sin manto freático somero) al considerar la contribución del manto freático sin una merma en el desarrollo y rendimiento del cultivo.

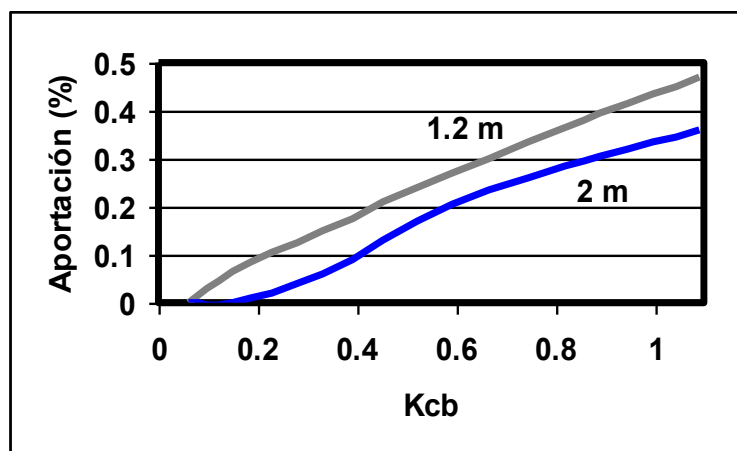


Figura 6.13 Porcentaje de aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos en función del coeficiente de cultivo para algodón a dos profundidades (1.2 y 2 m) del manto freático y una salinidad de 15.4 dS/m (adaptado de Ayars y Hutmacher, 1994).

Gardner (1958) presentó una solución analítica para el flujo ascendente estacionario de un manto freático asumiendo la siguiente relación para la conductividad hidráulica no saturada:

$$K(h) = K_s e^{-\alpha h} \quad (6.24)$$

Donde K es la conductividad hidráulica saturada ($L T^{-1}$), y α es un parámetro del suelo (L^{-1}) usualmente obtenido por regresión. Suelos ligeros, que tienen poros grandes se drenan con poca succión, tienen usualmente valores grandes de α que los correspondientes para suelos pesados. Estos últimos tienen una distribución de poros más amplia y valores de α pequeños tal como se muestra en la **Tabla 6.8**.

La solución analítica derivada por Gardner (1958) para el flujo ascendente máximo estacionario de un manto freático somero en presencia de evaporación de un suelo desnudo, tiene la siguiente estructura:

$$A_c = K_s \left(\frac{1}{e^{P_{mf} \alpha} - 1} \right) \quad (6.25)$$

Donde: A_c , es la tasa de ascenso capilar (LT^{-1}) debido al gradiente evaporativo entre las superficies del suelo y el manto freático; K_s es la conductividad hidráulica a saturación (LT^{-1}); P_{mf} es la profundidad del manto freático (L), y α define la característica hidrodinámica del suelo usando el modelo de Gardner. Parámetros hidrodinámicos de algunos suelos se encuentran en la **Tabla 6.8**. El ascenso capilar evaporativo no puede ser mayor a la evapotranspiración potencial de una superficie libre.

Tabla 6.8 Parámetros del modelo de Gardner para la conductividad hidráulica para diferentes suelos reportados por Amoozegar-Fard et. al., 1984.

Suelo	α (cm^{-1})	K_s ($cm hr^{-1}$)
Franco arcilloso	0.126	4.03200
Franco Arenoso "Columbia"	0.100	5.00400
Arena Dackley	0.513	0.36000
Franco arenoso fino "Gila"	0.0443	0.87480
Franco "Guelph"	0.034	1.32120
Franco limoso "Ida"	0.026	0.10512
Franco "Indio"	1.69	1.40400
Franco arcilloso "Latene"	0.0386	0.18756
Franco "Panoche"	0.0416	3.96000
Franco arcilloso "Pima"	0.014	0.41400
Arena "Plainfield"	0.126	12.38400
Franco arenoso	0.111	3.60000
Franco limoso	0.0139	0.20664
Arcilla "Yolo"	0.0367	0.03348
Franco arenoso fino "Yolo"	0.024	0.14652

Ejemplo. Estimar la tasa evaporativa máxima para el suelo franco arcilloso de la **Tabla 6.8**, para una profundidad de 50 cm.

$$A_c = K_s \left(\frac{1}{e^{\frac{P_{mf}}{\alpha}} - 1} \right) = \frac{4.032 \text{ cm hr}^{-1}}{e^{50\text{cm}(0.126\text{cm}^{-1})} - 1} = 0.007418 \text{ cm hr}^{-1} = 1.78 \text{ mm d}^{-1}$$

Hargreaves y Samani (1992) mencionan que si la parte inferior de las raíces están en contacto con un manto freático somero (1.5 a 2 m), estas pueden absorber de 20 a 50% de sus requerimientos diarios del manto freático dependiendo de las propiedades hidrodinámicas del suelo.

La **Figura 6.14** muestra la contribución de un manto freático somero en las demandas hídricas de los cultivos para diferentes distancias entre la parte inferior de la zona de raíces y la parte superior del manto freático. Por ejemplo, si el agua subterránea se encuentra a 70 cm debajo de la zona radical en un suelo franco-arenoso, la contribución del agua subterránea a los requerimientos hídricos es de aproximadam

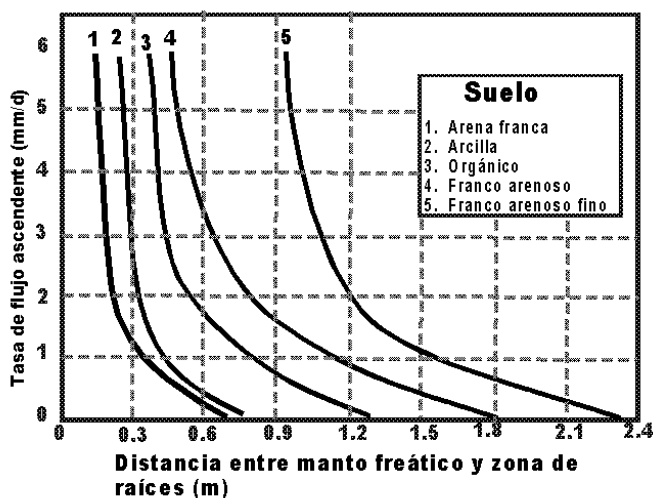


Figura 6.14 Contribución del manto freático a la zona de raíces en mm/d (Doorenbos y Pruitt, 1977).

6.6 REQUERIMIENTOS DE LAVADO

Si la conductividad eléctrica es menor de 0.7 dS/m y las pérdidas de agua por percolación profunda son mayores al 15% de los requerimientos hídricos de los cultivos, no es necesario aplicar láminas de lavado (FAO, 1980). Para el agua de riego con alto contenido de sales (valores de CE_i entre 0.7 y 3 dS/m), se requieren láminas de lavado para mantener un contenido bajo de sales en la zona de raíces. En este caso, el agua percolada puede ser insuficiente para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo.

El equilibrio entre la salinidad del suelo y el contenido de sales del agua de riego es una función de la cantidad de sales percoladas de la solución del suelo y la cantidad

de agua de riego que se mezcla con la solución del suelo. Esta tasa es llamada la fracción de lavado (FL), la cual depende de las características del suelo, el método de riego y el manejo del agua.

La fracción de lavado, es la parte del agua aplicada que debe drenarse de la zona de raíces para mantener éstas en los niveles de salinidad deseada, puede ser calculada usando balance de sales en estado de equilibrio:

$$L_d CE_d = L_i CE_i \quad (6.26)$$

Donde L_d es la lámina de agua drenada de la zona de raíces (L), L_i es la lámina total infiltrada (L), CE_i es la conductividad eléctrica del agua de riego, CE_d es la conductividad eléctrica del agua drenada de la zona de raíces. La lámina infiltrada es la suma de los requerimientos de riego del cultivo (L_r) y de lavado o drenado (L_d).

Para calcular la fracción de lavado es necesario establecer los valores críticos de la salinidad del suelo (CE_d), por ejemplo en términos de la conductividad eléctrica de la pasta saturada, que en promedio no debe exceder la zona de raíces.

La fracción de lavado (FL) puede calcularse usando la siguiente ecuación alternativa:

$$FL = \frac{L_d}{L_i} = \frac{CE_i}{CE_d} \quad (6.27)$$

El análisis anterior asume un balance unidimensional de las sales en el perfil de suelo. Para sistemas de riego por goteo, el análisis es un poco diferente ya que las sales se acumulan en los límites del bulbo de mojado que se forma.

Ejemplo. Si se tiene que la lámina requerida es de 70 mm, la CE_i de 0.5 dS/m, y una $CE_d = 5$ dS/m para un cultivo moderadamente tolerante a la salinidad, calcular la lámina total de riego a aplicarse.

$$L_i = L_r + L_d = L_r + L_i \frac{CE_i}{CE_d}$$

$$L_i = \frac{L_r}{1 - \frac{CE_i}{CE_d}} = \frac{L_r}{1 - FL} = \frac{70}{1 - \frac{0.5}{5}} = 77.78 \text{ mm}$$

De esta manera se requieren 7 cm para satisfacer los requerimientos de riego del cultivo y de 1 cm para lavar las sales de la zona radical.

Doorenbos y Pruitt (1977) proponen la siguiente relación para riego por gravedad y por aspersión de baja frecuencia:

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} \quad (6.28)$$

Donde CE_r es la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en la zona radical (dS/m).

La relación para riego de alta frecuencia (microirrigación) es:

$$FL = \frac{CE_i}{2(CE_r)_{max}} \quad (6.29)$$

Donde $(CE_r)_{max}$ se refiere a la conductividad máxima tolerable por el cultivo (rendimiento nulo) obtenido del extracto de saturación del suelo (ver **Tabla 6.9**).

Ejemplo. Estimar la fracción de lavado (FL) para un cultivo de papa regada por surcos con agua con una salinidad de 2 dS/m con un rendimiento potencial del 90%. De acuerdo a la **Tabla 6.9**, el valor de $CE_r = 2.5$ dS/m para un rendimiento del 90%, por lo tanto:

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} = \frac{2}{5 * 2.5 - 2} = 0.19$$

Tabla 6.9 Tolerancia a la salinidad de algunos cultivos agrícolas, en términos de conductividad eléctrica (CE), en función del rendimiento esperado (en porcentaje con respecto al rendimiento máximo potencial).

Cultivo	100%		90%		80%		50%		$(CE_r)_{max}$
	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	
Aguacate	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	3.7	2.4	6
Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.3	5.4	3.6	8.8	5.9	16
Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27
Brócoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14
Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	8
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	7
Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4
Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.2	3.4	9
Limón	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8
Maíz	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10
Manzano y Pera	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8
Melón	2.2	1.5	3.6	2.4	5.7	3.8	9.1	6.1	16
Naranja	1.7	1.1	2.3	1.6	3.2	2.2	4.8	3.2	8
Papa	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10
Rábano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	9
Sorgo	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.3	18
Soya	5.0	3.3	5.5	3.7	6.2	4.2	7.5	5.0	10
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13

Cultivo	100%		90%		80%		50%		$(CE_r)_{max}$
	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	
Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13.0	8.7	20
Vid	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12
Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.1	8

Nota: El subíndice "r" se refiere a la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo y el subíndice "i" al agua de riego (adaptado de Ayers y Westcot, 1976). Valores de CE son expresados en $dS\ m^{-1}$.

Los cultivos son más sensibles al estrés osmótico (salinidad) en sus primeras etapas fenológicas debido a la alta sensibilidad de los nuevos tejidos de las hojas a efectos osmóticos e iónicos.

6.7 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO

Para calendarizar el riego basándose en un balance hídrico se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Seleccionar la fecha inicial (usualmente la fecha de siembra o de primer riego) y estimar el contenido de humedad inicial para el día $i = 0$ (H_0).
2. Estimar la profundidad radical para el día i (P_{ri}).
3. Estimar el factor de abatimiento (f) para el día i en función del cultivo y etapa fenológica.
4. Estimar el coeficiente de cultivo para el día i . Cuando no hay cultivo el K_c es menor de 0.2.
5. Estimar las láminas para las constantes de humedad del suelo para la profundidad radical dada: lámina almacenada a capacidad de campo (L_{CC}), lámina almacenada a punto de marchitamiento permanente (L_{PMP}), lámina de la humedad aprovechable (LHA), y lámina de la humedad fácilmente aprovechable (LHFA).

$$L_{CC} = \theta_{CC} P_r \quad (6.30)$$

$$L_{PMP} = \theta_{PMP} P_r \quad (6.31)$$

$$L_{PMP} = \theta_{PMP} P_r \quad (6.32)$$

$$LHFA = f (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) P_r = f (HA) P_r \quad (6.33)$$

1. Estimar el factor de estrés hídrico (K_e) para el día i .

Donde: HA, es la humedad aprovechable en porcentaje para el día i

$$HA = \frac{(\theta_{CC} - \theta_i)}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} 100 \quad (6.34)$$

2. Estimar la evapotranspiración real (ET_r) para el día i .

$$HA = \frac{(\theta_{CC} - \theta_i)}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} 100 \quad (6.35)$$

3. Si hubo lluvia en el día i , estimar la precipitación efectiva (P_e) para el día i .

4. Registrar el riego (R) en el día i cuando éste se inicie en la mañana del día i, pero si fue por la tarde del día i, se registra en el día siguiente (i+1).
5. Estimar la cantidad de agua percolada (PP_i) en función de la lámina máxima (L_{max_i}) que puede almacenar el suelo a un contenido de humedad antecedente (θ_i).

$$L_{max} = (\theta_{cc} - \theta_i)Pr_i \quad (6.36)$$

La lámina percolada puede ser estimada como:

$$PP_i = R_i + Pe_i - L_{max_i} \text{ si } (R + P_e)_i > L_{max_i} \quad (6.37)$$

6. Realizar el balance de humedad para el día i.

$$L_i = L_{i-1} + R_i + Pe_i - ETr_i - PP_i \quad (6.38)$$

7. Estimar el contenido de humedad crítica (θ_c) y la lámina crítica (L_c)

$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (6.39)$$

$$L_c = \theta_c P_r \quad (6.40)$$

8. Si la humedad en términos de lámina (L_i) es menor que la crítica (L_c), aplicar el riego al siguiente día con una lámina de riego igual a:

$$L_r = L_f - L_i \quad (6.41)$$

Usualmente la lámina final (L_f) es la lámina a capacidad de campo (L_{CC}).

9. Ir al paso 2.

Ejemplo de cálculo

A continuación se presenta un ejemplo para la estimación de la fecha y lámina de riego. Dada la siguiente información del perfil de suelo que se asume homogéneo:

Profundidad (cm)	arena (%)	arcilla (%)	Limo (%)	θ_{sat}	θ_{cc}	θ_{pmp}
0-200	41	36	23	0.380	0.361	0.224

Y asumiendo un contenido de humedad inicial del perfil del suelo de $\theta_i = 0.321$, una profundidad de raíces constante de 100 cm y un $f = 0.4$, realizar el balance de humedad considerando las siguientes entradas y salidas representadas en la siguiente tabla:

DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ET_r (mm)	7.79	8.74	7.41	7.04	8.09	8.68	8.48	8.7	6.77	5.73
Precipitación Efectiva (mm)		0.51				6.11				

En los 100 cm de la zona de raíces se puede almacenar alrededor de 361 mm de agua [$L_{CC} = (0.361-0.0) * 1000 = 361$ mm] que corresponde al contenido de humedad a capacidad de campo, como el contenido de humedad inicial es de $\theta_i = 0.321$, el contenido de humedad expresado como lámina, almacenada en los 100 cm de suelo es de $L_i = 321$ mm para el día 1. El riego tiene que aplicarse cuando el contenido de humedad alcance un valor de $\theta_c = 0.3062$ que corresponde a una lámina disponible en el suelo de 306.2 mm [$L_c = 0.361 - (0.361-0.224) * 0.4 * 1000$]. De esta manera en la siguiente tabla se muestra que se requieren dos riegos (día 3 y 10) con una lámina total de 110.8 mm.

Balance de humedad para el período de 10 días

DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_i (mm)	321	313.2	305.0	353.6	346.5	338.4	335.9	327.4	318.7	312.0
ET_r (mm)	7.79	8.74	7.41	7.04	8.09	8.68	8.48	8.7	6.77	5.73
Precipitación Efectiva (mm)	0	0.51	0	0	0	6.11	0	0	0	0
Riego (mm)	0	0	56.0	0	0	0	0	0	0	54.8
Percolación (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L_f (mm)	313.2	305.0	353.6	346.5	338.4	335.83	327.4	318.7	312.0	361.0

La lámina de riego L_i y L_f son los contenidos de humedad, expresados como láminas, al inicio y fin del día respectivo.

En el ejemplo anterior se asume conocida la evapotranspiración, sin embargo, su valor debe estimarse tal como se discute con detalle en el capítulo 5.

6.8 REQUERIMIENTOS DE RIEGO (RR)

Los requerimientos de riego netos (RR_n) se definen como la suma de necesidades de agua menos las aportaciones de agua a la zona radical ocurridas durante un periodo de tiempo:

$$RR_n = ET + LL - Pe - Am \quad (6.42)$$

Donde:

ET : Evapotranspiración real de los cultivos (L).

LL : Lámina de Lavado (L).

Pe : Precipitación efectiva (L).

Am : Aportación del manto freático (L).

En ausencia de lluvias e ignorando aportaciones menores, se toman los requerimientos de riego como la evapotranspiración real acumulada desde el último riego. Los requerimientos de riego brutos (RR_b) definen la lámina bruta a aplicar y se calculan dividiendo la lámina neta entre la eficiencia.

6.9 INTERVALO DE RIEGO (IR)

El intervalo de riego (IR), es el tiempo entre dos riegos y puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$IR = \frac{HFA}{RRDD} \quad (6.43)$$

Donde: HFA, es la humedad fácilmente aprovechable y RRDD son los requerimientos de riego de diseño diario durante el intervalo de riego.

Ejemplo. Se tiene que HFA = 150mm y el valor de RRDD = 10.71 mm d⁻¹, calcular el intervalo de riego. Si se utiliza la ecuación anterior (6.43) se obtiene un intervalo de IR = 14 días.

Para diseñar un sistema de riego se requieren los requerimientos de riego de diseño diarios (RRDD) los cuales son el RR diario que el sistema debe suministrar para proporcionar una cantidad adecuada de riego durante el periodo de máxima demanda. Grandes valores de RRDD están relacionados con cultivos de sistema radical profundo, sensitivos al estrés hídrico y con grandes consumos de agua. De igual manera se tienen grandes valores de RRDD en lugares con bajas precipitaciones y altas temperaturas. Es difícil estimar RRDD ya que requiere conocer el valor de RR durante el intervalo de riego de máxima demanda.

El servicio de conservación de suelos de los E.E.U.U recomienda la siguiente ecuación para el cálculo de RRDD para fines de diseño de sistemas de riego:

$$RRDD = 0.034 \frac{ET_m^{1.09}}{HFA^{0.09}} \quad (6.44)$$

Donde: ET_m, es la evapotranspiración total promedio para el mes de máxima demanda (mm), HFA es la humedad fácilmente aprovechable que se encuentra entre dos riegos consecutivos a la profundidad de raíces durante el periodo de máxima demanda.

6.10 NÚMERO DE RIEGOS (NR)

El número de riegos (NR) es el total de riegos requeridos durante el ciclo fenológico del cultivo y puede ser estimado usando la siguiente ecuación:

$$NR = \frac{RR_{acum}}{HFA} \quad (6.45)$$

Donde: RR_{acum}, son los requerimientos de riego acumulados desde la siembra hasta la cosecha.

Ejemplo. Si se tiene que un suelo tiene HFA = 75 mm por metro de suelo y el cultivo tiene una profundidad de raíces promedio de $Pr = 150$ cm, calcular el número de riegos si $RR_{acum.} = 500$ mm.

$$NR = \frac{500mm}{(75mm/m)1.5m} = 4.44 \approx 5 \text{ riegos}$$

6.11 PRÓXIMO RIEGO

Uno de los objetivos de la calendarización del riego es estimar la fecha del próximo riego. La siguiente ecuación permite estimar los días que faltan para el próximo riego:

$$ND = \frac{HD}{ET_{prom}} \quad (6.46)$$

Donde: HD, es la humedad fácilmente aprovechable disponible (mm) en la zona radical; ET_{prom} , es un estimador de la evapotranspiración real promedio del cultivo ($mm\ d^{-1}$) hasta que se aplique el riego.

Ejemplo. Si se tienen 20 mm de humedad disponible en el suelo y una evapotranspiración promedio del cultivo en los siguientes días de $4\ mm\ d^{-1}$, estimar el número de días que faltan para el siguiente riego.

$$ND = \frac{HD}{ET_{prom}} = \frac{20\ mm}{4\ mm\ d^{-1}} = 5 \text{ días}$$

6.12 CAPACIDAD DEL SISTEMA (Q_s)

Para poder satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, un sistema de riego debe proveer del caudal necesario conocido como la capacidad del sistema (Q_s), volumen/tiempo, el cual puede ser estimado usando la siguiente ecuación si se asume que se tiene solamente un cultivo:

$$Q_s = \left(\frac{RRDD}{E_r} \right) S_r \quad (6.47)$$

Donde: RRDD, son los requerimientos de riego de diseño diarios (LT^{-1}); S_r , es el área (L^2) dominada por el sistema de riego; E_r , es la eficiencia de riego, eficiencia desde que sale el agua de la fuente hasta que llega a la zona de raíces, en fracción decimal, que se obtiene al multiplicar la eficiencia de aplicación (E_a) por la eficiencia de conducción (E_c):

$$E_r = E_a E_c \quad (6.48)$$

El término de capacidad de sistema (Q_s) se utiliza con frecuencia en el diseño de sistemas de riego para indicar el caudal máximo necesario para satisfacer los requerimientos máximos de una área de riego. Sin embargo también puede indicar el caudal de abastecimiento en la cabecera de la parcela para aplicar una lámina de riego en un tiempo dado.

Por ejemplo si $A = 50$ ha, $E_r = 60\%$, y $RRDD = 8$ mm d^{-1} , de acuerdo a la ecuación anterior y homogeneizando unidades se tiene:

$$Q_s = \left(\frac{0.008 \text{ m d}^{-1}}{0.6} \right) 500,000 \text{ m}^2 = 6,666.67 \text{ m}^3 / \text{d}^{-1} = 77.16 \text{ l s}^{-1}$$

Que indica el caudal necesario que el sistema de riego debe suministrar, 77.16 lps las 24 horas del día, si solamente se va a operar el sistema 20 horas, se tendría:

$$Q_s = 6,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \frac{1 \text{ d}}{20 \text{ hr}} = 333.334 \text{ m}^3 / \text{hr}^{-1} = 92.6 \text{ l s}^{-1}$$

Por lo tanto la capacidad del sistema en l s^{-1} se incrementaría en alrededor 20% (24 hr/20, hr = 1.2), para un tiempo de operación de 10 horas sería $q_s = (77.16 \text{ l s}^{-1})(24 \text{ hr}/10 \text{ hr}) = 185.18 \text{ l s}^{-1}$, lo cual indica un incremento del 140% con respecto a la capacidad para 24 horas.

La ecuación general para calcular la capacidad del sistema (Q_s) en l s^{-1} es:

$$Q_s = K \frac{RRDD_z A}{E_r HPD} \quad (6.49)$$

Donde:

- K: es una constante con un valor de 277.8 para las unidades usadas.
- RRDD_z: son los requerimientos de riego de diseño diario de la zona de riego (mm/día). RRDD es equivalente a la lámina bruta (L_b) a aplicar.
- A: es el área total (ha) a regar.
- E_r: es la eficiencia global de riego (porcentaje).
- HPD: son las Horas Por Día que el sistema opera (hr).

La **Tabla 6.10** contiene los gastos requeridos (capacidad del sistema) para aplicar una lámina bruta (L_b) en una hectárea dada de acuerdo a diferentes horas de operación del sistema.

Tabla 6.10 Capacidad de descarga diaria requerida (Q_a) en $\ell \text{ s}^{-1}$ por hectárea según ecuación (6.49).

<i>Capacidad del sistema requerido en $\ell \text{ s}^{-1}$ por hectárea</i>				
L_b (cm)	Horas de operación diaria del sistema (hr día ⁻¹)			
	12	16	20	24
0.5	1.2	0.9	0.7	0.6
0.88	2.0	1.5	1.2	1.0
1	2.3	1.7	1.4	1.2
2	4.6	3.5	2.8	2.3
3	6.9	5.2	4.2	3.5
4	9.3	6.9	5.6	4.6
5	11.6	8.7	6.9	5.8
6	13.9	10.4	8.3	6.9
7	16.2	12.2	9.7	8.1
8	18.5	13.9	11.1	9.3
9	20.8	15.6	12.5	10.4
10	23.1	17.4	13.9	11.6
15	34.7	26.0	20.8	17.4
20	46.3	34.7	27.8	23.1

Un gasto de $1 \ell \text{ s}^{-1}$ durante 24 hr en una hectárea es equivalente a aplicar una lámina de riego de 8.8 mm asumiendo una eficiencia de aplicación del 100% (ver segunda hilera de **Tabla 6.10**). Un requerimiento de riego diario de 8.8 mm/d puede ser muy conservador en zonas húmedas y subhúmedas. Al gasto por hectárea se le conoce como Coeficiente Unitario de Riego (CUR). Existen varias reglas empíricas relacionadas con el CUR, por ejemplo el valor de $1 \ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ se ha usado durante muchos años para definir el gasto necesario al diseñar zonas de riego, de esta manera 100 ha requieren de $100 \ell \text{ s}^{-1}$ para satisfacer la necesidades hídricas de los cultivos en la época crítica.

6.13 TIEMPO DE RIEGO (T_r)

Uno de los problemas a que se enfrenta continuamente un agricultor es definir el tiempo de riego que permita aplicar la lámina apropiada a la zona de raíces del cultivo. Existen varios métodos para definir el tiempo de riego, los dos métodos más importantes están basados en:

- El flujo entregado en la cabecera de la parcela.
- En la intensidad de aplicación del sistema.

El primero se usa primordialmente en sistemas de riego por gravedad y el segundo en sistemas de riego presurizados.

6.13.1 Estimación del tiempo de riego basado en el flujo de entrega

Para definir los tiempos de riego en sistemas por gravedad se usa la ecuación de continuidad en términos de la diferencia entre el volumen de agua que ha entrado (V_e) y el que ha salido (V_s) de la parcela, que debe ser igual al que se ha almacenado (V_a) en un tiempo de riego (T_r).

$$V_e - V_s = V_a \quad (6.50)$$

Si se asume que el volumen de salida es pequeño y se estiman los volúmenes de entrada y almacenados se tiene:

$$V_e = V_a \quad (6.51)$$

$$\text{Volumen} = Q T_r = L_b A \quad (6.52)$$

Donde: Q_s , es el gasto de abastecimiento en la cabecera de la parcela o capacidad de descarga del sistema, L_b es la lámina total aplicada a la parcela de área A . Si se tiene un estimador de la lámina bruta en función de la lámina neta (L_n) que corresponde a la lámina a almacenar en la zona de raíces y la eficiencia de aplicación (E_a), resolviendo para T_r se obtiene la siguiente relación:

$$T_r = \frac{\text{volumen bruto}}{\text{gasto}} = K \frac{A L_n}{Q_s E_a} \quad (6.53)$$

Donde: T_r , es el tiempo de riego (min) para aplicar la lámina neta L_n (cm), Q_s es el gasto disponible en lps; A , es la superficie a regar en ha; E_a , es la eficiencia de aplicación en forma decimal y K , es una constante de conversión igual a 1668 que resulta al usar las unidades indicadas.

Ejemplo. Calcular el tiempo de riego para aplicar una lámina neta de 8 cm, en una hectárea con una eficiencia de aplicación del 70% y un gasto continuo de 10 l s^{-1} . Usando la **ecuación (6.53)** resulta un tiempo de riego de 1906 min que corresponden a 31.8 hr.

A manera ilustrativa la **Figura 6.15** muestra la duración del riego (T_r) en horas para aplicar una lámina bruta (L_b) de 10 cm en función de la superficie a regar bajo cuatro gastos de suministro de 40 (línea superior), 80, 120 y 160 l s^{-1} (línea inferior) calculado usando la **ecuación (6.53)**.

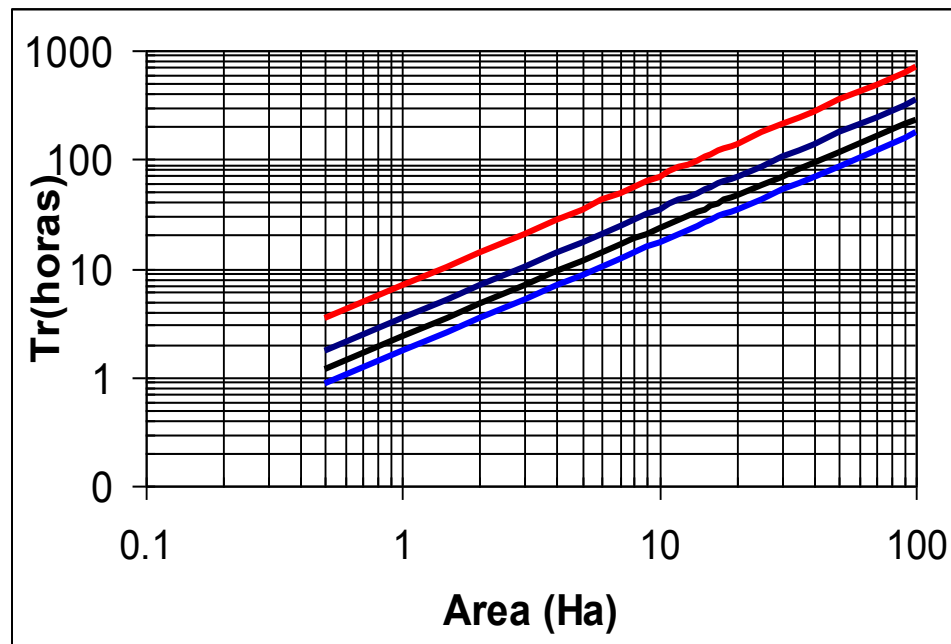


Figura 6.15 Tiempo de riego para aplicar una lámina bruta de 10 cm en función del área dominada bajo cuatro gastos (40, 80, 120 y 160 ℓ s⁻¹).

6.13.2 Estimación del tiempo de riego basado en la intensidad de aplicación

Los tres pasos para obtener el tiempo de riego usando la intensidad de aplicación de los emisores son:

1. Determinar los requerimientos brutos desde el último riego en mm (RR_b).
2. Determinar la intensidad de aplicación del sistema en mm/hr (I_a).

$$I_a = K \frac{Q}{A} \quad (6.54)$$

Donde: Q es el gasto de aplicación del emisor(es) en ℓ min⁻¹ o simplemente lpm; A es el área de influencia del emisor(es) en m²; y K es un factor de conversión igual a 60 para las unidades usadas.

3. Determinar el tiempo de riego en horas usando la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{RR_b}{I_a} \quad (6.55)$$

Ejemplo. Calcular la intensidad de aplicación para un sistema de riego por goteo con cintilla con un espaciamiento de 90 cm y un gasto de 2.5 lpm/100 m de cinta:

$$I_a = K \frac{Q}{A} = 60 \frac{2.5}{100 \times 0.9} = 1.66 \text{ mm hr}^{-1}$$

Ejemplo. Estimar la intensidad de aplicación para un sistema por aspersión portátil con un espaciamiento entre aspersores de 6 m y con un espaciamiento de laterales de 6 m. El gasto medio de los aspersores es de 15 ℓ min⁻¹.

$$I_a = K \frac{Q}{A} = 60 \frac{15 \text{ ℓ min}^{-1}}{6 \text{ m} \times 6 \text{ m}} = 25 \text{ mm hr}^{-1}$$

Ejemplo. Calcular el tiempo de riego, si se tiene un déficit hídrico desde el último riego (dos días) de $RR_b = 7\text{mm}$ y una velocidad de aplicación del sistema de $I_a = 1.16 \text{ mm h}^{-1}$:

$$T_r = \frac{RR_b}{I_a} = \frac{7 \text{ mm}}{1.16 \text{ mm h}^{-1}} = 6 \text{ h}$$

Para regar una sección de riego se requieren 6 horas, si se tienen tres secciones de riego en una parcela de 1 ha, se requiere un tiempo de riego neto de 18 horas y un gasto de aproximadamente 92 ℓ s⁻¹.

6.14 LÁMINA DE RIEGO APLICADA

En ocasiones se requiere conocer la lámina de riego aplicada por un sistema de riego. Resolviendo para L_b la ecuación (6.53) se obtiene una expresión para estimarla:

$$L_b = \frac{L_n}{E_a} = K \frac{T_r Q_s}{A} \quad (6.56)$$

Donde L_b es la lámina neta (cm), T_r es el tiempo de riego, Q_s es el gasto de aplicación, A es la superficie a regar en ha, y K es una constante de conversión que depende de las unidades usadas (**ver Tabla 6.11**)

Tabla 6.11 Valores del coeficiente K para diferentes unidades usadas en la ecuación (6.56).

L_b	K	A	Q_s	T_r
cm	6×10^{-4}	ha	ℓ s ⁻¹	min
cm	0.036	ha	ℓ s ⁻¹	h
cm	1×10^{-7}	ha	ℓ min ⁻¹	min
cm	6×10^{-4}	ha	ℓ min ⁻¹	H

Usando la **ecuación (6.56)** se generó la **Tabla 6.12** que presenta la lámina bruta aplicada en una hectárea por un sistema de riego en función del gasto en ℓ s⁻¹ ha⁻¹ y el

tiempo de riego en hr. Se observa que para un gasto de 1 en $\ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y un tiempo de riego de 24 horas (1 día) se aplica una lámina de 8.6 mm.

Tabla 6.12 Lámina bruta en cm, aplicada en función del gasto y tiempo de riego.

T _r (hr)	Gasto ($\ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)								
	0.50	0.75	1	2	4	6	10	60	80
1	0.02	0.03	0.04	0.07	0.14	0.22	0.36	2.2	2.9
2	0.04	0.05	0.07	0.14	0.29	0.43	0.72	4.3	5.8
3	0.05	0.08	0.11	0.22	0.43	0.65	1.08	6.5	8.6
4	0.07	0.11	0.14	0.29	0.58	0.86	1.44	8.6	11.5
6	0.11	0.16	0.22	0.43	0.86	1.30	2.16	12.9	17.3
8	0.14	0.22	0.29	0.58	1.15	1.73	2.88	17.3	23.0
10	0.18	0.27	0.36	0.72	1.44	2.16	3.60	21.6	28.8
12	0.22	0.32	0.43	0.86	1.73	2.59	4.32	25.9	34.5
14	0.25	0.38	0.50	1.01	2.02	3.02	5.04	30.2	40.3
18	0.32	0.49	0.65	1.30	2.59	3.89	6.48	38.8	51.8
24	0.43	0.65	0.86	1.73	3.46	5.18	8.64	51.8	69.1
30	0.54	0.81	1.08	2.16	4.32	6.48	10.80	64.8	86.4
72	1.30	1.94	2.59	5.18	10.4	15.5	25.9	155.5	207.3

6.15 LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y LOS MÉTODOS DE RIEGO

En las secciones anteriores se han presentado los principios para calendarizar el riego, la mayoría de ellos se aplican para el riego por gravedad y por aspersion, donde el suelo funciona como almacén de humedad por lo que el riego es pesado y de poca frecuencia. En sistemas de riego por goteo o por microaspersión, el riego es ligero y con mucha frecuencia, a intervalos de unos cuantos días.

Los métodos para calendarizar el riego basado en el intervalo y lámina de riego se clasifican en los siguientes tipos:

1. Intervalo constante - lámina variable.
2. Intervalo variable - lámina constante.
3. Intervalo variable - lámina variable.
4. Intervalo constante - lámina constante.

Los tres primeros tipos son los más usados, su aplicabilidad depende del tipo de sistema de aplicación de riego utilizado y de las características evapotranspirativas del cultivo. El último esquema prácticamente tiene poca aplicabilidad por el deficiente uso del agua ya que de usarse podría generar condiciones de subirrigación o sobreirrigación. Posiblemente su uso pueda restringirse en invernaderos donde las condiciones ambientales son muy estables, sin embargo las láminas deben de incrementarse a medida que el cultivo se desarrolla.

6.15.1 Riego por gravedad

La calendarización del riego en sistemas por gravedad es usualmente bajo un esquema variable tanto en lámina como en intervalo de riego (**Figura 6.16**). Al inicio del ciclo las láminas son pequeñas y los intervalos son grandes, a medida que se alcanza la máxima demanda de riego los intervalos se acortan y las láminas se incrementan, para finalmente disminuir las láminas y alargar los intervalos de riego en la parte final del ciclo fenológico del cultivo. Bajo este esquema de calendarización se presentan periodos de superávit y déficit de humedad que mantienen a la planta bajo un estrés hídrico considerable tal como se indica en la **Figura 6.16**.

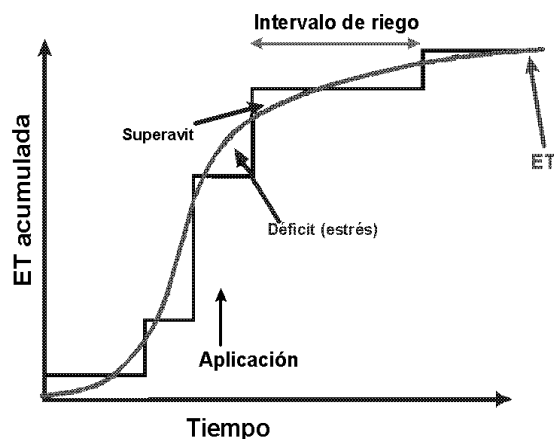


Figura 6.16 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego por gravedad.

Por sus características el riego por gravedad (surcos y melgas) puede tener bajas eficiencias al aplicar láminas pequeñas. El agua entra en la parte superior de la parcela y corre a lo largo del surco o melga, presentándose un necesario sobreriego en la parte superior y un subriego en la parte final (inferior). Es posible mejorar el riego, al diseñar, nivelar y manejar correctamente los caudales en los surcos o melgas para aplicar eficientemente láminas pequeñas (menores de 8 cm). En caso contrario, el riego es muy ineficiente.

Como los tiempos de avance, infiltración y recesión del agua en las melgas o surcos dependen de las características del suelo, longitud, rugosidad y geometría del surco o melga así como de los gastos de aplicación, el manejo del riego se dificulta por la gran variabilidad del suelo en espacio y tiempo. Ante esta problemática, el regador tiene que tener un buen conocimiento de las variables que intervienen en el riego. En riego por gravedad se requieren realizar los cambios en el manejo del riego durante el ciclo agrícola. Entre las prácticas de manejo más comunes para mejorar la eficiencia y uniformidad del riego se encuentran: variación de gastos, riego intercalado, y riego intermitente.

Uno de los problemas más comunes en el riego por gravedad es la aplicación de grandes láminas de agua, especialmente durante el primer riego.

6.15.2 Riego por aspersión

Por su versatilidad, la calendarización del riego en los sistemas de riego por aspersión es muy variada. Permiten calendarizar de manera similar a los sistemas de riego por gravedad, intervalo y láminas variables. Sin embargo, en los sistemas de riego de movimiento continuo (lineal y circular), se fija una lámina de aplicación por vuelta y no se cambia con frecuencia, por lo que el riego se programa de acuerdo a una lámina definida y un intervalo variable que depende de las características evapotranspirativas del cultivo. En los sistemas fijos o portátiles, es posible usar el esquema de intervalo fijo con lámina variable ya que se puede regular la lámina con el tiempo de riego por sección de riego.

El riego por aspersión puede aplicar láminas de riego uniformemente con pérdidas mínimas por percolación y escurrimiento.

Por los altos costos de mano de obra y transporte, no se recomienda aplicar láminas pequeñas en los sistemas portátiles. Se deben de aplicar láminas tan grandes como lo permita el suelo y el cultivo. La limitante anterior no existe en los sistemas de movimiento lineal o circular, en los cuales es posible aplicar láminas pequeñas y frecuentes. Aunque tienen la limitante potencial de incrementar la humedad ambiental hasta poder propiciar condiciones favorables para la presencia de enfermedades y plagas.

Las condiciones atmosféricas adversas limitan la aplicación del riego por aspersión, estas pueden ser altas velocidades de viento a las que están asociadas bajas eficiencias de aplicación del riego, alto déficit de vapor atmosférico restringe la aplicación de láminas pequeñas.

Para sistemas de riego por aspersión cada aspersor comercial cuenta con tablas de información preparadas por el fabricante en donde se pueden obtener datos como la intensidad de aplicación (véase **Tabla 6.13**) a partir de la intensidad de aplicación por aspersor y el espaciamiento entre aspersores.

Con datos de la intensidad de aplicación (I_a), obtenida de la **Tabla 6.13**, y los requerimientos de riego brutos (RR_b) es posible obtener los tiempos de riego que aplica un sistema de riego por aspersión usando la **ecuación (6.55)**.

6.15.3 Riego por microirrigación

La calendarización de riego en los sistemas de riego por microirrigación (goteo y microaspersión) es generalmente bajo el esquema de intervalo constante y lámina variable. Se tienen dos o más intervalos fijos de riego durante el ciclo, por ejemplo 3, 2, 1, 2, 3 días. Que indican que al inicio los riegos son cada tercer día, después cada dos y en la época de máxima demanda son diarios, para alargarse después a dos y finalizar cada tres al final del ciclo. Las láminas de riego son variables dependiendo de las características evapotranspirativas del cultivo durante el intervalo de riego. La lámina variable se aplica al variar el tiempo de riego por sección.

La estimación de la evapotranspiración presentada en secciones anteriores asume que el agua se infiltra de la superficie terrestre, mojando la totalidad desde la superficie del suelo. Para el caso del riego por goteo, donde solamente se moja una

parte de la superficie, se deben de hacer algunas correcciones para estimar correctamente la evapotranspiración.

Una de las características distintivas del riego por goteo es la baja intensidad de aplicación pero con gran frecuencia, incluso varias veces durante un día. Estos sistemas son diseñados para aplicar las demandas diarias de los cultivos durante largos periodos de tiempo. A diferencia de los sistemas de riego por aspersión son diseñados para aplicar los requerimientos hídricos de los cultivos en pocas horas, es decir, alta intensidad con baja frecuencia.

La baja intensidad con alta frecuencia tiene la ventaja de generar un ambiente hídrico favorable para las raíces, al suministrar el riego en casi la misma tasa en que se va consumiendo tal como lo muestra la **Figura 6.17**. El intervalo de variación en la humedad del suelo, es corto y constante, ya que el intervalo de riego es pequeño. Al tener el contenido de humedad del suelo muy abajo del contenido de humedad a saturación, el flujo del agua es controlado por las fuerzas capilares, resultando en una reducción en las pérdidas por percolación al concentrarse el movimiento del agua en la zona de raíces donde se presentan las mayores variaciones del potencial. A medida que el intervalo de riego se reduce, el método de aplicación de aproxima al riego hidropónico donde el riego es continuo.

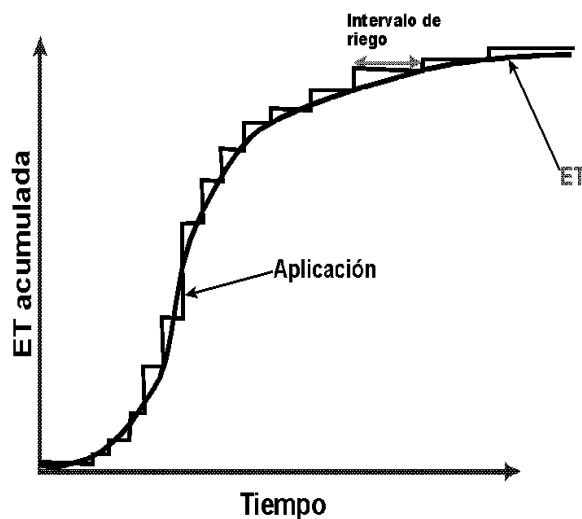


Figura 6.17 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego de baja intensidad y alta frecuencia

Tabla 6.13 Intensidad de aplicación en pulgadas por hora en función del espaciamiento entre aspersores y el gasto de aplicación del aspersor.

Espaciamiento (ft)	Gasto de aplicación del aspersor en galones por minuto																					
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	25	30	40	50	70	100	200	300	400
20x20	0.48	0.72	0.96	1.20	1.44	1.69																
30x30	0.21	0.32	0.43	0.54	0.64	0.75	0.86	0.96	1.07	1.18	1.28	1.61										
30x40	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80	0.88	0.96	1.20	1.61									
30x50		0.19	0.26	0.32	0.39	0.45	0.51	0.58	0.64	0.71	0.77	0.96	1.28	1.61								
30x60			0.21	0.27	0.32	0.37	0.43	0.48	0.54	0.59	0.64	0.80	1.07	1.34	1.61							
40x40		0.18	0.24	0.30	0.36	0.42	0.48	0.54	0.60	0.66	0.72	0.90	1.20	1.50								
40x50			0.19	0.24	0.29	0.34	0.39	0.43	0.48	0.53	0.58	0.72	0.96	1.20	1.44							
40x60				0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.44	0.48	0.60	0.80	1.00	1.20	1.61						
50x50				0.19	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39	0.42	0.46	0.58	0.77	0.96	1.16	1.54						
50x60					0.19	0.22	0.26	0.29	0.32	0.35	0.39	0.48	0.64	0.80	0.96	1.28	1.61					
50x70						0.19	0.22	0.25	0.28	0.30	0.33	0.41	0.55	0.69	0.83	1.10	1.38					
60x60							0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.40	0.54	0.67	0.80	1.07	1.34					
60x70								0.21	0.23	0.25	0.28	0.34	0.46	0.57	0.69	0.92	1.15	1.61				
60x80									0.20	0.22	0.24	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	2.01			
80x80							0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.23	0.30	0.38	0.45	0.60	0.75	1.05	1.50			
120x120															0.20	0.27	0.33	0.47	0.67	1.34		
180x180																0.12	0.15	0.21	0.30	0.59	0.89	1.19
240x240																	0.12	0.17	0.33	0.50	0.67	
300x300																		0.11	0.21	0.32	0.43	

6.16 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ

La disminución del rendimiento de los cultivos debido al estrés hídrico depende de la especie y la fase fenológica donde se presente. El manual 33 de la FAO (Doorembos y Kassan, 1986) presenta un análisis de la variación en el rendimiento debido al déficit hídrico para varios cultivos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\left(1 - \frac{R_r}{R_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m}\right) \quad (6.57)$$

Donde:

R_r : es el rendimiento real.

R_m : es el rendimiento máximo posible.

ET_r : es la evapotranspiración real, ET_m es la evapotranspiración máxima.

K_y : es el factor de respuesta en el rendimiento debido al estrés hídrico.

Un valor de $K_y = 1$ significa que una reducción de ET_r con respecto a ET_m causa el mismo efecto en la reducción en R_r con respecto a R_m . Por ejemplo si se estresa el maíz durante su fase mas sensible (floración) y se tiene un valor de $K_y = 1.5$, lo que indica que con una reducción en 50% de ET_r ($ET_r / ET_m = 0.5$) se tendría una reducción en 75% ($1.5 * 0.5$) en el rendimiento, sin embargo si se tiene la misma reducción en ET_r durante la etapa de maduración ($K_y = 0.2$) se tendría solamente una reducción del rendimiento de solamente un 10% ($0.2 * 0.5$). Analizando la **Tabla 6.14**, se tiene que los cuatro cultivos ahí citados son más sensibles durante la etapa de floración y en menor grado durante la formación de grano. Si se requiere estresar el cultivo, su efecto negativo es menos pronunciado durante la maduración, a excepción del tomatillo.

Las **Tablas 6.15 y 6.16** muestran la variación de la evapotranspiración real (columna 5) y evapotranspiración potencial (columna 4) para los cultivos de maíz y trigo de acuerdo con las fechas de siembra convencionales del Valle del Carrizo, Sinaloa.

Tabla 6.14 Valores del parámetro K_y para algunos cultivos agrícolas (Doorembos y Kassan, 1986).

CULTIVO	ETAPA FENOLOGICA				
	Vegetativo	Floración	Formación de grano o producto	Maduración	Total Ciclo
Caña de azúcar	0.75		0.5	0.1	1.2
Frijol	0.2	1.1	0.75	0.2	1.15
Maíz	0.4	1.5	0.5	0.2	1.25
Melón	0.45 - 0.7	0.8	0.8	0.3	1.1
Papa	0.45 - 0.8		0.7	0.2	1.1
Sorgo	0.2	0.55	0.45	0.2	0.9
Soya	0.2	0.8	1.0	-	0.85
Trigo invierno	0.2	0.6	0.5	-	1.00
Trigo primavera	0.2	0.65	0.55	-	1.15
Tomate	0.4	1.1	0.8	0.4	1.05

Tabla 6.15 Láminas netas (L_n) de riego en función de la fecha de siembra para el maíz en el DR076.

Fecha de siembra Maíz	Número de riegos de auxilio	Máx. L_n por riego auxilio (mm)	L_n potencial (mm)	L_n real (mm)	Máx. intervalo de riego (días)	Mín. intervalo de riego (días)
5/9/98	4	53	330	286	44	21
15/9/98	4	53	347	300	46	23
25/9/98	4	56	335	290	47	24
5/10/98	4	56	350	312	50	24
15/10/98	4	63	372	326	55	21
25/10/98	5	60	397	351	57	20
5/11/98	5	61	417	370	60	20
15/11/98	5	68	445	391	60	18
25/11/98	5	64	475	429	58	16
5/12/98	6	73	515	454	56	14
15/12/98	7	65	544	486	55	14
25/12/98	7	74	563	504	54	12
5/1/99	8	65	606	542	52	11

L_n -Lámina neta parcelaria.

Tabla 6.16 Requerimientos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el DR076.

Fecha siembra Maíz	Número riegos auxilio	Máx. Ln por riego auxilio (mm)	ET potencial (mm)	ET real (mm)	Máx. intervalo de riego (días)	Mín. intervalo de riego (días)
5/11/98	2	67	264	222	56	25
15/11/98	2	66	270	214	57	25
25/11/98	3	67	283	245	57	25
5/12/98	3	65	303	262	54	23
15/12/98	3	65	324	280	55	20
25/12/98	3	71	328	284	53	17
5/1/99	4	65	381	331	50	16

Ln - Lámina neta parcelaria.

6.17 EJEMPLOS

Ejemplo 6.17.1 Se obtuvieron los siguientes valores experimentales para el crecimiento radical de trigo en India (Subbaiah y Rao, 1994):

t(día)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	120
P _r (m)	0.1	0.28	0.56	0.75	0.96	1.2	1.43	1.62	1.8	1.8

Estimar la profundidad radical usando los modelos propuestos por Fereres et al. (1981), Borg y Grimes (1986), Palacios y Martínez (1978) y Hanks y Hill (1980) usando los siguientes parámetros:

Variable	Valor
Duración ciclo	120 días
T _{max}	80 días
P _{max}	1.8 m
P _o	0.08 m
W	0.81
α _o	2.30
α ₁	5

Modelo de Fereres et al. (FF):

$$P_r = P_o + (P_{\max} - P_o) \frac{t}{t_{\max}} ; t < t_{\max}$$

$$P_r = P_{\max} , t > t_{\max}$$

Modelo de Borg y Grimes (BG):

$$P_r = P_{\max} (0.511 + 0.511 \operatorname{sen}_{rad} (3.03 \frac{t}{t_{\max}} - 1.47)), t \leq t_{\max}$$

$$P_r = P_{\max}, \quad t > t_{\max}$$

Modelo de Palacios y Martínez (PM):

$$P_r = \frac{\frac{t}{t_{\max}}}{W + (1 - W) \frac{t}{t_{\max}}} P_{\max}$$

Modelo de Hanks y Hill (HH):

$$P_r = \frac{P_o + (P_{\max} - P_o)}{1 - \exp \left[\alpha_o - \alpha_1 \left(\frac{t}{t_{\max}} \right) \right]}; \quad t < t_{\max}$$

$$P_r = P_{\min}, \quad \text{para } t > t_{\max}$$

RESULTADOS:

Tipo	t(día)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	120
Experimental	P _r (m)	0.1	0.28	0.56	0.75	0.96	1.2	1.43	1.62	1.8	1.80
Modelos	FF	0.10	0.30	0.51	0.725	0.94	1.155	1.37	1.585	1.80	-
	BG	0.01	0.10	0.32	0.62	0.96	1.30	1.58	1.77	1.84	-
	PM	0.03	0.27	0.52	0.766	0.99	1.21	1.42	1.61	1.80	1.90
	HH	0.17	0.28	0.47	0.71	0.99	1.25	1.46	1.60	1.69	-

Ejemplo 6.17.2 Determinar la lámina de riego total a aplicar en un sistema de riego por aspersión si la demanda máxima del cultivo de papa es de 6 mm d⁻¹, la eficiencia de aplicación del 85%, la conductividad eléctrica del agua de riego de 1 dS m⁻¹. Se espera tener una reducción en rendimiento menor al 20%.

De la **Tabla 6.9** se obtiene un valor máximo del extracto de saturación (CE_r) de 3.1 dS m⁻¹ para papa con un rendimiento esperado del 80% del potencial.

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} = \frac{1}{5(3.1) - 1} = 0.069$$

La lámina de agua que debe aplicarse para mantener un balance de sales neutral durante el periodo de máxima demanda es:

$$L_i = \frac{L_r}{1 - FL} = \frac{6 \text{ mm } d^{-1}}{1 - 0.069} = 6.44 \text{ mm } d^{-1}$$

La lámina bruta requerida es:

$$L_b = \frac{L_i}{e_a} = \frac{6.44}{0.85} = 7.6 \text{ mm } d^{-1}$$

Ejemplo 6.17.3 Si se tiene un gasto de 60 lpm para regar una parcela de 1 ha, estimar el tiempo requerido para aplicar una lámina bruta de 7 mm.

$$T_r = K \frac{A L_b}{Q} = 166.66 \frac{1 \text{ ha } 7 \text{ mm}}{60 \text{ lpm}} = 19.44 \text{ hr}$$

Si se tienen tres secciones de riego, se requieren 6.5 horas netas (19.44/3) para regar cada sección de riego.

Ejemplo 6.17.4 Estimar la reducción en rendimiento debido a la presencia de estrés hídrico durante diferentes etapas fenológicas y durante todo el ciclo del cultivo de maíz, esto es, se aplica la misma lámina de riego pero se reduce (presencia de estrés) durante una etapa fenológica.

R _m (Ton ha ⁻¹)	ET _r /ET _m en ETAPA (%)				
	Vegetativa	Floración	Formación de grano	Maduración	Total
8	50	50	50	50	50
8	70	70	70	70	70
8	80	80	80	80	80
8	90	90	90	90	90

Reducción en rendimiento (1 - R_r / R_m):

R _m (Ton ha ⁻¹)	Reducción en rendimiento en ETAPA en % (1-R _r /R _m)				
	Vegetativa	Floración	Formación grano	Maduración	Total
8	20	75	25	10	62.5
8	12	45	15	6	37.5
8	8	30	10	4	25
8	4	15	5	2	12.5

Rendimiento esperado (R_r):

Rendimiento esperado (R_r) en ton ha^{-1}				
Vegetativa	Floración	Formación de grano	Maduración	Total
20	75	25	10	62.5
12	45	15	6	37.5
8	30	10	4	25
4	15	5	2	12.5

Ejemplo de cálculo para la etapa vegetativa con una aplicación de los requerimientos de riego del 50% ($ET_r / ET_m = 0.5$).

Estimación del rendimiento esperado (R_r) con respecto al rendimiento máximo (R_m), para un valor de $K_y = 0.4$ y de $ET_r / ET_m = 0.5$:

$$\frac{R_r}{R_m} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) = 1 - 0.4(1 - 0.5) = 0.8$$

El rendimiento esperado (R_r) al aplicar solamente el 50% de los requerimientos de riego durante la etapa vegetativa del maíz es:

$$R_r = 0.8(R_m) = 0.8(8 \text{ ton ha}^{-1}) = 6.4 \text{ ton ha}^{-1}$$

Reducción en rendimiento:

$$\text{reducción} = 1 - \frac{R_r}{R_m} = 1 - 0.8 = 0.2 = 20\%$$

“Cuando bebas agua, recuerda la fuente.”

Proverbio chino

**Calendarización
del riego en
invernadero**



7

CAPITULO 7

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN INVERNADERO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

7.1 INTRODUCCIÓN

Las plantas necesitan agua para su crecimiento y para controlar su temperatura, especialmente en los días soleados y con poca ventilación. La transpiración ha sido definida como el proceso por el cual el vapor de agua escapa de las plantas, principalmente desde los estomas de las hojas, a la atmósfera. La transpiración es gobernada por las mismas relaciones físicas que rigen la evaporación y afectada por los mismos factores, además de otros que son característicos del tipo de vegetación.

En un invernadero, las condiciones ambientales han sido modificadas para hacer más eficiente el proceso transpirativo y fotosintético. Una considerable cantidad de energía se requiere para evaporar el agua de las cavidades estomáticas, si el agua no se evaporara, esta energía se acumularía y calentaría la planta. Sin la transpiración las plantas podrían alcanzar temperaturas letales.

El proceso de la transpiración en un invernadero es particularmente importante, debido al reducido espacio en el que se desarrolla la planta y la intrínseca relación entre las variables ambientales que interactúan con ella. El suelo tiene un papel fundamental pues es el embalse que regula el suministro disponible para el uso de las plantas. La transpiración está controlada esencialmente por la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y el gradiente de presión de vapor. Para el calendario del riego, deben atenderse estos factores, más las plantas y el suelo, tales como magnitud de las superficies de las raíces, tipo de hojas, densidad de las plantas y conductividad hidráulica del suelo.

Las magnitudes del movimiento del agua, del suelo hacia la planta inicia con la absorción de agua por las raíces y sus conducción ascendente vía pequeños conductos tubulares conocidos como xilema, los cuales se dividen hacia las ramas y hojas para finalizar en terminales que permiten la interacción con la atmósfera llamados estomas.

En este capítulo se exponen los parámetros útiles para la calendarización del riego en Invernaderos; para ello se describen los procesos de transpiración que será la lámina de agua a reponer mediante el riego. La distribución de esta cantidad de agua, depende del medio de cultivo y de la edad de la planta, que al ser reducido su espacio debe ser "cuasi" continuo, por lo que la exigencia del manejo se vuelve crítica. En un invernadero, por las características que aquí se describen se establece un calendario de "alta frecuencia" en el riego.

7.2 EL RIEGO EN INVERNADEROS

Desde el punto de vista agronómico, un invernadero es aquella estructura que protege al cultivo de la lluvia y el viento mediante una cubierta transparente, usualmente en forma de película plástica o de vidrio, la cual permite el paso de la radiación solar dificultando la pérdida de calor, en particular la banda del infrarrojo térmico. El grado de modificación climática va a depender del nivel tecnológico de los materiales empleados en su construcción y de los equipos complementarios de climatización, calefacción, humidificación, ventilación, enriquecimiento carbónico, iluminación artificial, etc.

La combinación de todos estos factores hace que los frutos de las plantas en un invernadero sean más suaves, tiernas y succulentas en comparación con las que crecen en campo abierto (**Figura 7.1**). Esta modificación climática permite adelantar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar fuera de época. En los últimos años se ha producido una expansión de la superficie protegidas en forma de: acolchados, túneles, invernaderos como respuesta a la demanda por parte del consumidor de los productos frescos a lo largo de todo el año.



Figura 7.1 Características de un pimiento cultivado en invernadero.

La modificación de las condiciones ambientales implica también la modificación de las necesidades hídricas de un cultivo en invernadero con respecto a un cultivo a cielo abierto. El uso de cubiertas protectoras agrega un componente que modifica las condiciones en las cuales se desarrollan los cultivos, reduciendo la evapotranspiración al reducir la radiación incidente y confinando el vapor de agua en un ambiente cerrado (**Figura 7.2**). A mayor control climático, menor es el consumo evapotranspirativo de los cultivos.



Figura 7.2 Invernadero tipo cenital de 5 naves.

Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar se han desarrollado diversos tipos de invernaderos, tratando de satisfacer necesidades de ventilación para controlar temperatura y humedad relativa. Uno de los más importantes en regiones templadas es el caracterizado por presentar una cubierta plástica que normalmente no dispone de calefacción o solo parcial para periodos cortos. Este tipo es representativo en México, sin embargo, el largo periodo estival con altas temperaturas, origina problemas al cultivo y el manejo en el interior. Aunado a esto, las técnicas de enfriamiento pasan por la optimización de la ventilación natural, a la utilización de sistemas de humidificación y casos extremos la ventilación forzada (Montero et. al. 2002).

Atendiendo el aspecto ambiental los invernaderos presentan aspectos negativos como son: las necesidades energéticas en climas fríos, la acumulación de residuos plásticos y aspectos paisajísticos. Los aspectos positivos son: la mejor utilización de los recursos naturales, radiación solar, suelo y especialmente el agua. En otras palabras lo que se tiene es un sistema intensivo que en sus manejo mismo conlleva la necesidad de aprender a controlar los sistemas que integran un invernadero.

7.3 REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS BAJO INVERNADERO

Además de las ventajas relativas al manejo de la cosecha y lograr mejor calidad en los frutos, una de las ventajas sustantivas de esta tecnología es precisamente el uso eficiente del agua; hablar de un ambiente protegido o en invernadero, implica un estricto control de las variables climáticas que interactúan con el cultivo. Entre los factores definitivos sobre la producción y desarrollo de las plantas se encuentra el riego, el cual se pretende aplicar de manera puntual y en las dosis exactas que el cultivo requiere, de ahí que conocer los requerimientos de riego sea la parte “fina” en el diseño de un sistema de riego en invernadero.

El agua que las plantas absorben es utilizada para su crecimiento y para controlar su temperatura, especialmente en los días soleados y con poca ventilación. La cantidad de agua que la planta necesita está en función de varios requerimientos, el más importante es el que se da a través de los estomas, por donde además también ocurre el proceso de entrada de bióxido de carbono que se requiere para llevar a cabo la fotosíntesis y en consecuencia el crecimiento de la planta.

Aun cuando el agua es absorbida por las raíces de la planta, es el proceso de la transpiración el que define la cantidad de agua que ha de ingresar a las plantas, en este sentido, el suelo o medio de cultivo tiene un papel fundamental pues es el embalse que regula el suministro de agua disponible para el uso de las plantas. La transpiración está controlada esencialmente por la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y el gradiente de presión de vapor. Depende también de factores de las plantas y del suelo, tales como magnitud de las superficies de las raíces, tipo de hojas, densidad de las plantas y conductividad hidráulica del suelo (**Figura 7.3**).

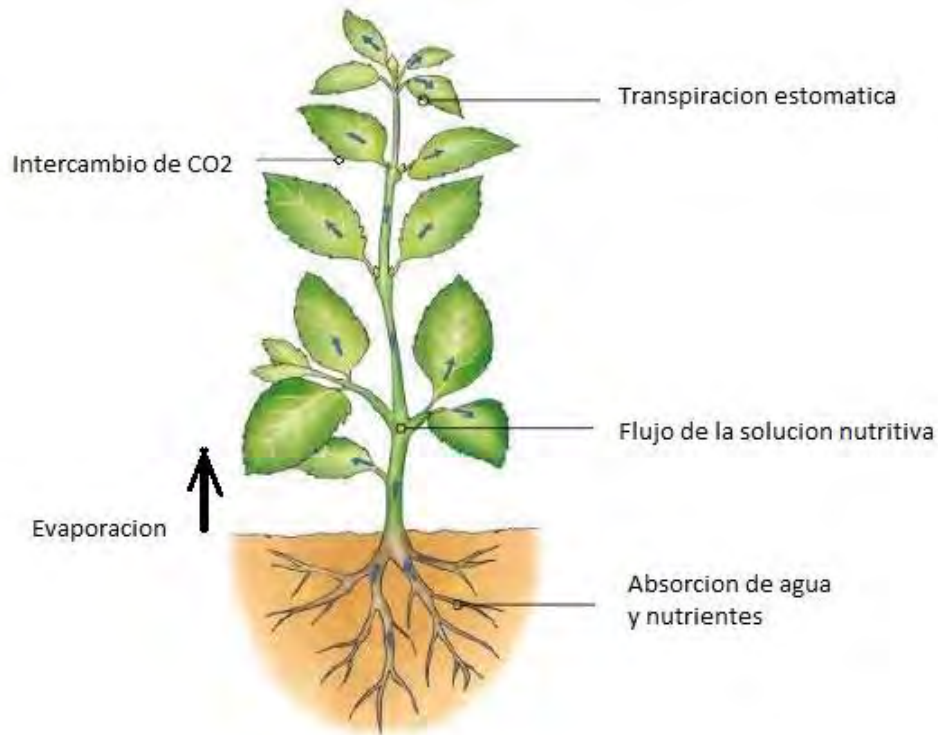


Figura 7.3 Circulación del agua del suelo a través de la planta hasta la atmósfera.

La transpiración estomática es la más importante, pues cerca del 90% del agua transpirada y la mayoría del bióxido de carbono utiliza este conducto (estomas). La apertura y cierre de los estomas está controlado por células oclusivas que al llenarse de agua se vuelven rígidas y turgentes, lo cual permite la abertura estomática. Pero, cuando la planta está deshidratada o en proceso de deshidratación, estas células colapsan provocando el cierre de la cavidad y en consecuencia no es posible realizar el intercambio de gases entre la planta y la atmósfera.

Cuando el agua está fluyendo por las hojas se crea una presión mayor que la atmosférica en las células de las hojas, a este estado se le conoce como turgor de la hoja. Durante la noche prácticamente no hay transpiración, sin embargo, la absorción de agua por las raíces puede continuar a una tasa reducida que puede generar una presión positiva en la hoja y forzar la liberación de agua por la hoja en forma líquida, a este fenómeno se le llama gutación (**Figura 7.4**).



Figura 7.4 El proceso de gutación.

Aunque la mayor parte del agua se pierde por transpiración, su deficiencia tiene graves consecuencias en el crecimiento, rendimiento y susceptibilidad de los cultivos a enfermedades y daño por insectos.

Existe una marcada variación horaria de los procesos evaporativos y transpirativos que se presentan en un invernadero, y es difícil separarlos, pues se presentan de manera simultánea. Bajo condiciones de invernadero, la evaporación del suelo o sustrato puede reducirse al mínimo, sobre todo cuando la superficie del suelo está cubierta.

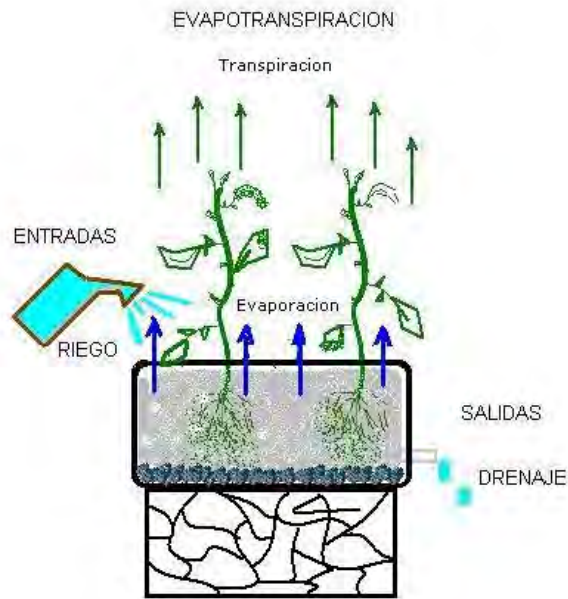


Figura 7.5 Formación de la ecuación de balance a nivel lisímetro.

En el invernadero el balance hídrico puede reducirse a la ecuación 7.1 (**Figura 7.5**).

$$RR = RIEGO - DRENAJE \pm \Delta\theta = Evaporacion + Transpiracion = ETr$$

Ec 7.1

En un invernadero, el planteamiento de la ecuación de balance hídrico permite definir la dosis de riego (**Figura 7.5**); idealmente después de aplicar una cantidad de agua mediante el riego y restar el excedente que ha sido drenado, la cantidad de agua está siendo utilizada por la planta es la lamina a reponer mediante el siguiente riego; El agua por reponer es la que la planta y el medio de cultivo está perdiendo, y que en su conjunto se denomina Evapotranspiración.

7.3.1 Evapotranspiración

En el planteamiento del balance hídrico dentro del invernadero, es la transpiración del cultivo convertido en lámina de riego lo que hay que restituir, caso nada fácil debido a que este parámetro es uno de los más importantes, y tal vez el más difícil de cuantificar, debido a que es el operador natural mediante el cual parte del agua utilizada por las plantas regresa al sistema atmosférico, en forma de vapor de agua. Bajo condiciones de invernadero, la evaporación directa del agua en el sustrato es mínima, por lo que la pérdida de agua se da básicamente en el proceso transpirativo de las plantas o por el drenaje, en caso de sistemas abiertos.

La evaporación es un proceso continuo que ocurre mientras el aire en contacto con la superficie no alcanza niveles de saturación con relación al vapor de agua en el aire. Cuando este punto de saturación se iguala, la condensación debe ocurrir para que la evaporación pueda continuar. Los efectos no se pueden analizar de manera aislada, pues necesariamente la evaporación tiene que estar conectada al balance energético del invernadero, donde al reducir la superficie de exposición, el agua solo es evapotranspirada por la planta (**Figura 7.6**).



Figura 7.6 Cultivo de frijol en invernadero, un alto Índice de Área Foliar para transpirar.

Aun cuando los métodos para estimar la evapotranspiración en invernadero son una extensión de los tradicionales en campo abierto, el enfoque “invernadero” implica adecuar metodologías para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia y real, en este sentido una manera de calcular la Evapotranspiración de los cultivos bajo el enfoque de la FAO es aquel que toma en cuenta los factores climáticos mediante el cálculo de la Evapotranspiración de referencia y la edad del cultivo caracterizado por un coeficiente de cultivo (K_c), usando la ecuación generalizada $ET_r = K_c ET_o$.

Valores experimentales de ET_r se obtienen a partir de estimaciones en el cambio de humedad o extracción de agua medido en Lisímetros o a través de un muestreo intensivo de humedad con sensores. Una forma más rápida, son los métodos micro meteorológicos, como la correlación turbulenta o la relación de Bowen, que requiere de estimaciones instantáneas, del orden del segundo, asociados con el flujo de vapor sobre una cubierta vegetal.

Como las condiciones y manejo de los cultivos (tutorado, densidad, altura, etc.) bajo condiciones de invernadero son distintas que bajo ambientes abiertos, se hace

necesario obtener los coeficientes de cultivo bajo ambientes protegidos. Fernández et al. (2001) obtuvieron experimentalmente las curvas del coeficiente para varios cultivos hortícolas. Valores de ET_o y ET_r se obtuvieron directamente en invernaderos por medio de lisímetros (**Figura 7.7**).

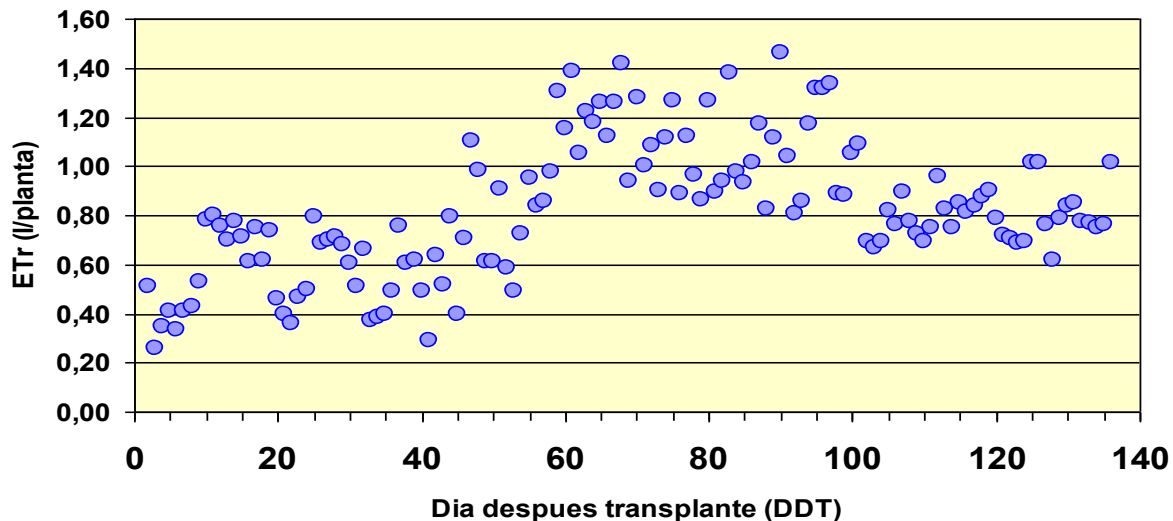


Figura 7.7 Evolución temporal de la ET_r en el ciclo de cultivo de tomate en invernadero.

7.4 MÉTODOS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_o) EN FUNCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

La estimación periódica de la evapotranspiración de referencia (ET_o) constituye la base de la calendarización del riego, sin embargo vale la pena hacer las siguientes aclaraciones; la primera es que la mayoría son ecuaciones empíricas algunas desarrolladas desde hace más de 50 años, pero que debido a la complejidad de los factores que involucra, tuvo que esperar el desarrollo de estaciones meteorológicas automatizadas que permitiera la generación o estimación de los factores de dicha ecuación.

Por otro lado, estas ecuaciones se generaron a partir de experimentos desarrollados a cielo abierto y bajo condiciones específicas, que han evolucionado en el tiempo y espacio adecuándose mediante modificaciones y coeficientes de tal manera de aplicarlas a la mayoría de las regiones del mundo.

Lograr el potencial productivo de los cultivos en invernadero, implica el conocimiento de los procesos que en él se desarrollan, debido a que generalmente estos se encuentran fuertemente inter-relacionados, por lo que, la transpiración de la planta será resultado del contenido de humedad en el ambiente y del suelo o sustrato, lo cual involucra variables tales como, temperatura, velocidad del viento, radiación, edad de la planta, etc., en la **Figura 7.8** se expone algunos de los procesos y variables

que influyen en el proceso transpirativo, y por consecuencia en la programación del riego en invernaderos.

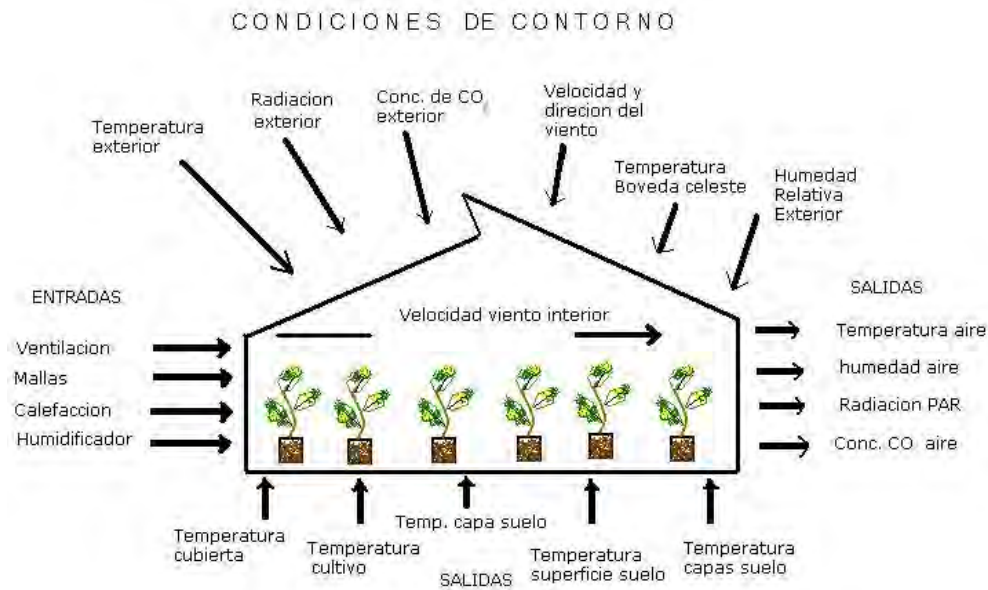


Figura 7.8 Procesos inherentes al balance de energía en un invernadero.

A pesar de los esfuerzos, la Evapotranspiración de referencia, es un parámetro muy complicado de estimar, desde el concepto mismo cronológicamente se ha venido adaptando esta definición, entre las aceptadas se tiene:

7.5 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_r)

7.5.1 Lisímetro

Un lisímetro es un depósito que está enterrado, de paredes verticales, abierto en la parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar. Obviamente debe desarrollarse vegetales cuya profundidad y desarrollo radicular no sean afectados por las dimensiones del mismo (**Figura 7.9**).

Existen básicamente de dos tipos: de balance y de pesada, y la diferencia consiste en que el primero se elabora la “caja” y posteriormente se rellena con el material donde se desarrolla el cultivo, dejando una salida para cuantificar el volumen drenado.

El contenido del suelo es llevado a un nivel bien determinado, nivel del fondo del lisímetro, y el agua de drenaje recogida y medida. Las dimensiones son variables de acuerdo al objetivo del estudio, con valores de superficies que oscilan entre 1 y 10 m², con una profundidad de 1 m de suelo o más.

El lisímetro de pesada, se construye en el lugar donde se lleva a cabo el experimento y solo se perforan las paredes y el piso donde se coloca la balanza para llevar el control del contenido de humedad en base al peso.



Figura 7.9 Esquema de un lisímetro de balance en un invernadero.

Es posible hacer la combinación de estos de acuerdo a las posibilidades y exigencias, un lisímetro de pesada es bastante caro de instalar, pero en cultivos de invernadero donde se coloca el sustrato en la maceta, es posible colocar esta sobre una balanza de precisión y poder hacer la ecuación de balance por cada maceta (planta).

En un lisímetro volumétrico, en un invernadero, como se muestra en la **Figura 7.5** es posible determinar la evapotranspiración del cultivo mediante la ecuación de balance, Lo que se mide es ET_r si está cubierto de vegetación y Ev si el suelo está desnudo.

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = Tr + Ev \quad \text{Ec 7.2}$$

en la etapa inicial del cultivo sin embargo, una vez que el cultivo incrementa su follaje (IAF) la ecuación queda:

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = ET_r \quad \text{Ec. 7.3}$$

7.6 CALENDARIZACION DEL RIEGO

Una vez determinada la cantidad de agua (L_r) que hay que reponerle al cultivo para su óptimo desarrollo y mejorar los rendimientos, surge la necesidad de abastecerlo en tiempo y forma adecuada con el mínimo exceso para evitar el lavado de sales y por consecuencia un ahorro sensible en el consumo del recurso agua y nutrientes que por esta vía se administran.

El calendario de riego se refiere a la oportuna aplicación en tiempo y cantidad de agua que la planta ha utilizado en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración. En riego de alta frecuencia como es el caso de los invernaderos, uno de los retos más importantes es adecuar la oferta a la demanda, situación que puede parecer sencillo pero en realidad tiene sus complicaciones en el sentido de que la Evapotranspiración del cultivo es un fenómeno continuo, a diferencia de la aplicación del riego que se comporta de manera puntual.

Las pérdidas de agua ocurren cuando esta se mueve fuera del alcance de las raíces debido a una diferencia de gradiente hidráulico, en respuesta a procesos naturales como la percolación y evaporación, cuando el agua se aplica en exceso de tal manera que el suelo no puede retener y almacenar en su espacio poroso, ocurre la percolación profunda y por lo tanto las raíces no pueden aprovechar esta agua.

En sistemas cerrados, estas limitantes cobran mayor importancia en el sentido que, preferentemente se usan sustratos como soporte de la planta cuyas características de porosidad y capacidad de retención de humedad en relación con el suelo sustancialmente difieren, así la programación de riegos en suelos es posible determinarla en días o un riego diario, mientras que en sustratos la cantidad de riegos puede ir desde los 4 en un día, en etapas iniciales hasta los 30 en la máxima demanda.

Esto debido principalmente a que en sistemas cerrados el volumen de "suelo", en este caso sustratos está limitado por un lado a la capacidad de la bolsa o de la cama según el caso, y por el otro a la capacidad de retención hídrica de dicho sustrato que al ser mucho menor que la del suelo, obligan a reducir el volumen del riego, pero aumentar el número de estos (**Figura 7.10**).



Figura 7.10 Sistema de riego por goteo en sustrato tezontle rojo.

Entre los métodos actuales para estimar el momento del riego, existe una técnica llamada "Speaking Plant" que traducido a nuestra lengua sería preguntarle a la planta; consiste en colocarle una serie de sensores a las plantas para determinar el punto en el cual comienza a sentir estrés debido a la falta de agua.

Básicamente se pueden mencionar tres métodos para determinar el momento del riego y son:

- A. Utilizando variables climáticas**
- B. Mediante variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato, y**
- C. Indicadores de estrés en la planta**

Lograr los mejores rendimientos tiene implicaciones diversas, no obstante en relación con el agua absorbida y el agua perdida por transpiración y evaporación las cantidades deben estar balanceadas, desde luego que lograrlo encierra una dificultad considerable, principalmente para poder cuantificar de manera rápida y precisa estos cambios, complicando así el problema para estimar el momento del riego.

Las dificultades para correlacionar los diversos factores para la Calendarización del riego han originado hacerlo por separado, es decir, se aísla alguno de ellos y se propone como indicador de riego, dentro de los invernaderos, en función del indicador que se desee medir existen diferentes instrumentos que constituyen una potente herramienta para dicho fin, el **Tabla 7.1** muestra los más importantes.

Tabla 7.1 Principales variables climática y sensores para determinar el momento del riego (Bringas, 2003)

Variables climáticas	Sensores
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Humedad relativa • Radiación solar • Radiación PAR • CO₂ 	Termopares, Resistivímetros (Pt, Cu) Psicrómetros, Capacitómetros Solarímetros, Piranómetros Sensores 'Quantum' Analizadores de gas por infrarrojo (IRGA)
Variables del sustrato	
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Potencial hídrico • Contenido de humedad 	Termopares, Resistivímetros (Pt, Cu) Tensiómetros Sensores acústicos (RMN)
Variables de la planta	
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura orgánica • Transpiración • Flujo de savia • Fotosíntesis • Diámetro del tallo • Potencial hídrico • Contenido hídrico 	Termopares, termómetros infrarrojos Lisímetros, Balances Flujómetros Cámaras foliares Transductores de variación lineal Psicrómetros foliares, cámara de presión Sensores acústicos (RMN)

7.6.1 Utilizando variables climáticas

Se refiere a métodos basados en la capacidad evaporante que tiene la atmósfera para succionar el agua de la superficie terrestre hacia esta, principalmente en forma de calor latente de vaporización. En invernadero es importante adaptar las condiciones para que dichos indicadores sean representativos, eso es, por ejemplo la cantidad de agua en el sustrato de ser suficiente y constante.

Se ha detectado (Fernández, et al., 2005) una directa relación entre las variables climáticas y el proceso de evapotranspiración, por ejemplo, la **Figura 7.11** muestra la relación que existe entre la radiación y la transpiración del cultivo, en los días soleados con más de $600 \text{ w m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, es posible observar mayor transpiración que en días nublados.

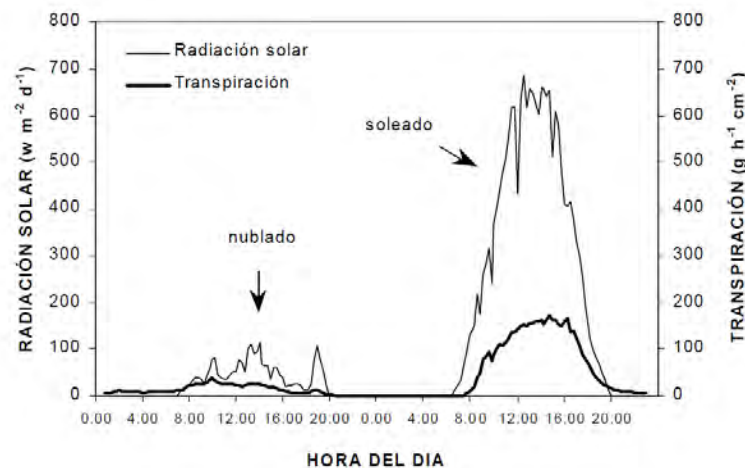


Figura 7.11 Variación de la transpiración en función de la radiación al interior del invernadero

i) Radiación solar

Cantidad de radiación necesaria para que se lleve a cabo la transpiración, este es un factor que involucra la física de la evaporación y asume que el agua requiere una cierta cantidad de energía, normalmente 2.45 k J por milímetro. Esto puede también ser escrito como 1 k J de radiación puede evaporar 0.41 ml de agua (Nederhoff, 2001) la radiación es medida generalmente fuera del invernadero, mientras que la transpiración ocurre en el interior de este. Una parte de la radiación solar (25-30 %) nunca alcanza las plantas debido a la reflexión del techo. Por lo tanto 1 kilojoule de radiación solar medida fuera no evapora 0.41 ml de agua dentro del invernadero, esto es una importante relación en el control del riego.

- 1 kilojoule medido afuera, transpira aproximadamente 0.3 ml dentro del invernadero, haciendo transformaciones, $1 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ puede evaporar 0.3 ml de agua cada segundo por metro cuadrado. Esto implica que en una hora ($0.3 \times 3600 = 1080 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) o lo que es lo mismo $1 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.
- Una intensidad de radiación de 1000 W m^{-2} ($1000 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) proporciona una tasa transpirativa en el invernadero de $1 \text{ litro m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$.
- La radiación total es el producto de la intensidad por el tiempo, esto usualmente se expresa en J cm^{-2} , cuando la intensidad de la radiación es máxima (alrededor de 1000 W m^{-2} o $1000 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) durante 1000 segundos (16.6 min) la suma de la radiación es $1\,000\,000 \text{ J m}^{-2}$, esto equivale a 100 J cm^{-2} (porque 1 m^2 es igual a $10\,000 \text{ cm}^2$).

- d) Es posible también conseguir la misma suma de radiación con una intensidad de 200 W m^{-2} durante $5\,000 \text{ s}$ ($1 \text{ h } 23.3 \text{ min}$)
- e) Con estas relaciones es fácil observar que 100 j cm^{-2} pueden transpirar 0.03 ml de agua por cm^2 , que es igual a 300 ml m^{-2} .

La suma de la radiación medida fuera de 100 j cm^{-2} provoca una transpiración de 300 ml m^{-2} en el invernadero. El conocimiento de estos datos, puede ayudar a hacer varios cálculos, por ejemplo para el cálculo de la demanda por estación, y escoger el escenario en el control del riego.

Si se pretende reponer la cantidad de agua transpirada, se debe dar 300 ml m^{-2} cada determinado que se acumula una radiación de 100 j cm^2 recibidos. No obstante existen buenas razones para dar más agua que solo la transpirada. Una cierta cantidad de agua puede ser aplicada por pequeños volúmenes y alta frecuencia o grandes volúmenes y menor frecuencia, con las consecuencias de mayor drenaje, también un tipo de crecimiento es importante para el volumen y frecuencia de riego. Y la sincronización desde el inicio por la mañana hasta el término por la tarde.

ii) Déficit de presión de vapor (DPV)

El aire tibio puede conducir mucho más vapor de agua que un aire frío, este principio es básico, por cada incremento de la temperatura, el contenido de agua se duplica, (Tabla 7.2). La humedad del aire puede también se expresada como déficit de presión de vapor (DPV) en kilopascales (kPa). El DPV es un indicador de la cantidad de agua que se pierde comparada con la saturada (esto es, comparada con el 100 % de Humedad Relativa). El DPV es la fuerza de conducción para la transpiración: la fuerza de la presión de vapor para que la planta transpire.

Técnicamente es mejor el uso del DPV que la HR en relación con el control de la transpiración como se observa en el cuadro siguiente la relación entre la humedad relativa, absoluta, el déficit de presión de vapor y el punto de rocío, las variaciones de estas variables no son aisladas, por lo que resulta necesario entender las relaciones, y con ello establecer comparativos del momento para aplicar los riegos.

Calefacción y ventilación son medidas para control de la humedad y por ende del DPV, si se incrementa la temperatura, el aire puede contener mayor cantidad de vapor de agua, decreciendo la humedad relativa pero incrementa el DPV como se observa en el **Tabla 7.2**.

Tabla 7.2 Humedad del aire en diferentes unidades. (Nederhoff, 2001)

HR %	10 °C			15 °C			20 °C			25 °C			30 °C		
	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C
100	9.4	0	10.0	12.9	0	15.0	17.3	0	20.0	23.1	0	25.0	30.4	0	30.0
95	8.9	0.06	9.2	12.2	0.09	14.2	16.5	0.12	19.2	21.9	0.16	24.1	28.9	0.21	29.1
90	8.5	0.12	8.4	11.6	0.17	13.4	15.6	0.23	18.3	20.8	0.32	23.2	27.4	0.42	28.2
85	8.0	0.18	7.6	10.9	0.26	12.5	14.7	0.35	17.4	19.6	0.48	22.3	25.9	0.64	27.2
80	7.5	0.25	6.7	10.3	0.34	11.6	13.9	0.47	16.4	18.8	0.63	21.3	24.3	0.85	26.2
75	7.1	0.31	5.8	9.6	0.43	10.6	13.0	0.59	15.4	17.3	0.79	20.3	2.8	1.06	25.1
70	6.6	0.37	4.8	9.0	0.51	9.6	12.1	0.70	14.4	16.2	0.95	19.1	21.3	1.27	23.9
60	5.6	0.49	2.6	7.7	0.68	7.3	10.4	0.94	12.0	13.9	1.27	16.7	18.3	1.70	21.4
50	4.7	0.61	0.1	6.4	0.85	4.7	8.7	1.17	9.3	11.6	1.59	13.9	15.2	2.12	18.4
40	3.8	0.74	-2.9	5.2	1.02	1.5	6.9	1.41	6.0	9.2	1.90	10.5	12.2	2.55	14.9
30	2.8	0.86	-6.7	3.9	1.20	-2.4	5.2	1.64	1.9	6.9	2.22	6.2	9.1	2.97	10.5

HR=humedad relativa (%); HA= humedad absoluta (g/m³); DPV= déficit de presión de vapor (kPa); Pto de R=temperatura del punto de rocío (°C).

La forma de control de invernadero a menudo ponen un límite para mantener una cierta humedad de aire, por ejemplo 70 o el 80 % RH. Esto no siempre es claro, pues los ordenadores pueden usar una temperatura supuesta mínima, pues la misma cantidad de humedad puede diferir en función de la temperatura.

La temperatura puede ser usada para varios motivos incluyendo la estimulación de la transpiración, la estimulación del movimiento de aire, la activación supuesta de las plantas, el cuidado de las plantas seco cuando la humedad es alta, o permitiendo CO₂ el enriquecimiento.

7.6.2 Mediante variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato

La Calendarización del riego se basa comúnmente en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el ciclo fisiológico del cultivo; cuando se usa la cantidad de humedad en el suelo como indicador para la Calendarización de riego, considera mantener el suelo o sustrato con humedad que pueda ser aprovechada por la planta.

Los sensores que miden el contenido de agua en el suelo permiten conocer cómo el cultivo va extrayendo el agua del suelo, de forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad. La **Figura 7.12** muestra la evolución del contenido de agua en el suelo durante varios ciclos de riego. El límite superior es fijado para evitar drenaje (**Figura 7.12**), y por tanto lavado de fertilizantes, y el límite inferior representaría el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico.

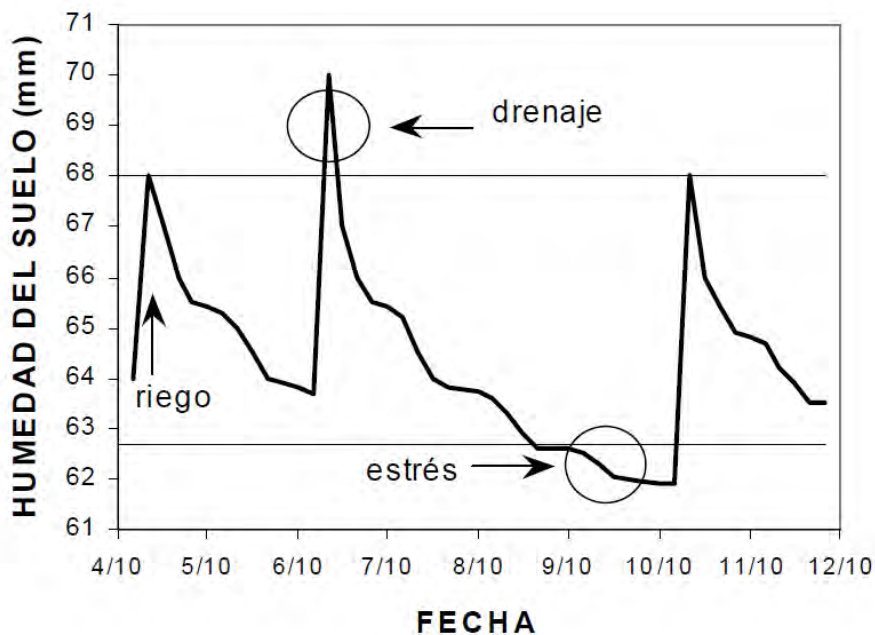


Figura 7.12 Evolución del contenido de agua del suelo tras varios ciclos de riego. (Fernández et. Al. 2005).

El equipo usado para estos fines es variado, sin embargo su uso está supeditado entre otras características, al tipo de sustrato, frecuencia de riegos, y área de raíces, entre ellos se tiene.

7.7 PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Debido principalmente al constante incremento en la superficie cultivada en invernaderos, la programación del riego se convierte en un tema central en este tipo de sistemas (**Figura 7.13**), por eso se han desarrollado metodologías dirigidas a solucionar el problema de la aplicación del riego, que actúen atendiendo los procesos evapotranspirativos que sufre el cultivo, activando el riego mediante sensores externos.



Figura 7.13 Sistema de riego por goteo tipo “espagueti” en bolsas de tezontle.

En el sistema invernadero, es normal que en el riego se apliquen los fertilizantes, por eso todos los equipos de fertirrigación suelen ser automáticos, donde la aplicación puede ser programada en función de la demanda, es decir, equipados con electrodos que cuantifican la cantidad de iones (Solución Nutritiva o toxicidad) de manera que permite relacionar los requerimientos de la planta para automatizarlo, y con ello combinar la aplicación del suministro hídrico, con el aporte de los fertilizantes en función de la demanda instantánea del cultivo.

7.7.1 Algunas maneras de programar el riego en invernaderos son:

1. Volumen constante.

Una vez definida la lámina de riego bruta y diario puede hacerse una distribución del agua; así por ejemplo si en la etapa inicial se está cultivando tomate, cuyos requerimientos de riego varían entre los 400 y 500 ml, en función del medio de cultivo, puede aplicar 4 riegos de 100 ml cada uno.

2. Tiempo constante.

Existen temporizadores muy prácticos que permite programar una serie de riegos durante el día, manteniendo un tiempo constante; así por ejemplo los mismos 400 ml diarios pueden ser distribuidos en tiempo; si cada planta tiene un gotero de 2 lph, significa que se aplica 0.55 ml s⁻¹, por lo que si necesito aplicar 400 ml, debo regar 182 seg, o lo que es lo mismo dar 4 riegos de 3 min cada uno.

Una combinación de estos métodos puede afinar el riego, si se pretende aplicar una mayor cantidad de agua (volumen) o más frecuente a la hora de máxima insolación, podría ser, dosis constante (volumen) y frecuencia variable, o viceversa, mantener la frecuencia constante y variar los volúmenes, la dependencia del mejor método esta en las características del cultivo, del medio del cultivo y del clima específico de la región.

3. Balance hídrico (demanda del cultivo)

Cuando utilizamos valores instantáneos, se puede decir que la programación es en tiempo real, el caso opuesto seria tener una serie de datos históricos de la variable que se haya seleccionado y calcular promedios, y con ellos llevar a cabo la programación del riego, en cuyo caso la programación del riego es en tiempo promedio.

Entre los factores que permiten determinar la demanda del cultivo, se menciono por ejemplo, el lisímetro de balance, dispositivo que permite llevar un control diario entre la cantidad de agua aplicada (RR) y consumida por la planta (ET_r), así mientras la planta incrementa su área foliar, incrementa también la superficie de exposición y por ende el numero de estomas, resultando en un incremento de la transpiración, o lo que es lo mismo los requerimientos de riego. Otros dispositivos que permiten este balance seria una balanza, sobre todo en cultivos en sustrato, una balanza registra el peso antes y después de la aplicación del riego, la diferencia es el peso de la planta por lo que así se cuenta con una aproximación bastante precisa del momento del riego.

4. Método de la radiación

Se ha indicado la relación que existe entre la radiación solar y la transpiración del cultivo en este sentido, es posible programar el riego mediante sondas de radiación, las cuales captan el nivel de radiación solar (W m⁻²) que resulta proporcional al consumo hídrico del cultivo, cuando este valor es alcanzado se accionan el riego. Esta programación puede ser fijada a partir de umbrales preestablecidos de radiación, en ese instante se activa el riego y el contador se pone a cero para iniciar un nuevo ciclo. Podría ser aplicable tanto a cultivos en suelo como hidropónicos.

Esquemáticamente se observa en la **Figura 7.14**, el procedimiento que puede iterarse como sigue:

- 1) Se define valor crítico para iniciar el riego, en este caso por ejemplo $X_c = 20$ Mj m⁻².

- 2) Estimar el valor del indicador al inicio del ciclo x_0 .
- 3) Ajustar el valor del indicador por día i , x_i .
- 4) Hacer el comparativo, si el indicador es menor o igual al crítico ($x_i \leq x_c$), y evaluar, se alcanza el momento del riego, por lo tanto se toma la decisión de aplicar el riego y se actualiza el indicador (x_i).
- 5) Actualizar el valor crítico (x_c) del indicador X para el día i .

Este proceso es iterativo y en función del indicador, mientras más pequeño sea el intervalo, el riego será más preciso.

En la **Figura 7.14** se ha definido el riego cada 3 Mj m^{-2} por lo que se aplicaran 5 riegos, las flechas indican la hora y el volumen habrá sido calculado previamente en función del consumo evapotransporativo con alguno de los métodos expuestos.

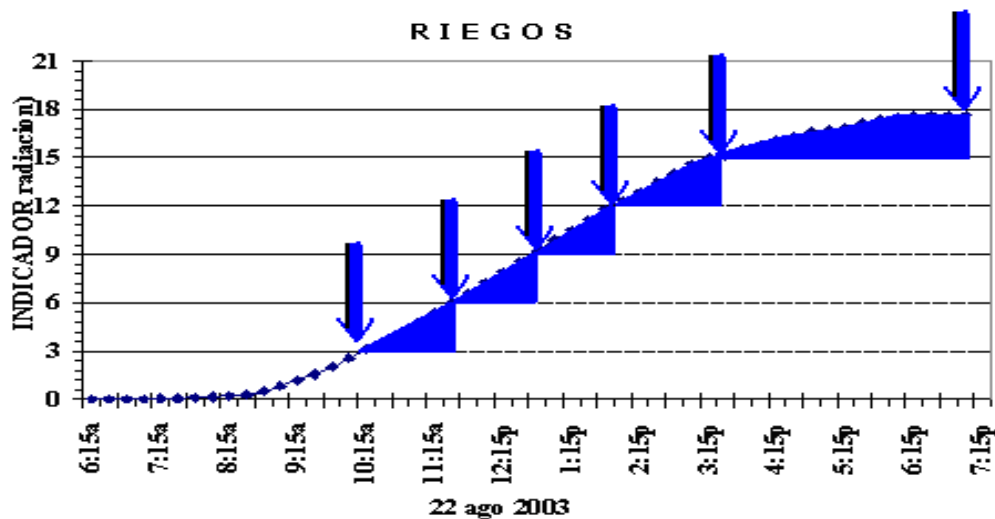


Figura 7.14 Calendarización del riego en función de la radiación.

Las plantas consumen grandes volúmenes de agua durante su ciclo, por cada kilogramo de producto agrícola se requieren varios cientos de kilogramos de agua. La eficiencia en invernadero de un metro cúbico de agua, es decir, la producción en kilos que se obtiene gracias a la utilización de esta cantidad de agua, puede llegar a ser hasta dos y tres veces superior en una superficie invernada que en un cultivo al aire libre. La **Figura 7.15** muestra la evolución de la transpiración de un cultivo de tomate en pleno desarrollo en un día, estimado mediante el sensor de flujo de savia y su correspondiente respuesta al momento de aplicación de los riegos. Resalta el mayor espaciamiento en tiempo del primer al segundo riego (de 10 AM hasta las 11:30 AM) luego los riegos son mas continuos.

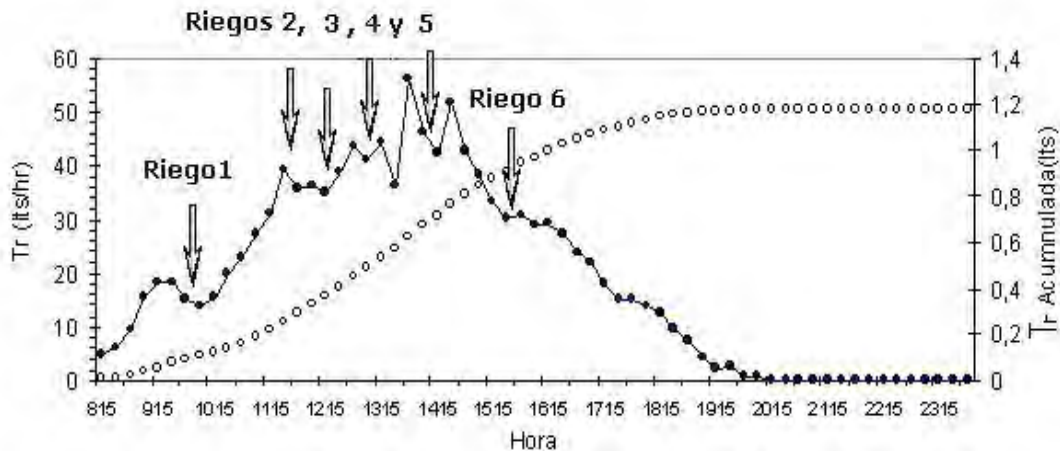


Figura 7.15 Sensibilidad del cultivo en la aplicación de los riegos.

Un inconveniente de la programación del riego en función de la radiación, es el margen de error en días nublados, en cuyo caso se aconseja combinar la radiación con algún otro factor, tal como una bandeja de drenaje, que confirme que la cantidad de agua aplicada es suficiente. Algunos resultados sobre este método (Flores, 2005) indican que en días soleados es conveniente aplicar un riego al final del día y en época de máxima demanda, se recomienda también aplicar un riego a la salida del sol.

5. Riego a la demanda

En cultivos protegidos, y sobre todo con riego tecnificado bien diseñado, este es una de los métodos más usados, ya que muestra resultados robustos (Figura 7.16). Se basa principalmente en el contenido de humedad del suelo o sustrato, a diferencia de los anteriores que utiliza indicadores ambientales so de la planta. Este método consiste en llevar un control preciso de la cantidad de riego aplicado en el tiempo, de acuerdo con lo consumido por la planta en sus procesos de transpiración. Para su aplicación, uno de los dispositivos más usados para su ejecución es la bandeja de lixiviación.

La bandeja de lixiviación, es un recipiente que contiene la solución hídrica y nutritiva que la planta necesita y permite cuantificar las variaciones hídricas del cultivo que se encuentra en la parte superior de esta. Se llama a la demanda, por que cuando la planta absorbe tanta agua que hace descender el nivel de la solución, este descenso es indicado por un electrodo, que al ya no estar contacto con la solución, emite una señal para que sea restituido mediante el riego.



Figura 7.16 Cultivo de hortalizas en sistemas hidropónicos.

Una de las limitantes para la elaboración del Calendario del riego en ambientes controlados es la falta de información relacionada que permita estimar los volúmenes suficientes y el poder aplicarlos oportunamente. Con la aplicación de riego de manera tradicional, aun en sistemas intensivos existe una tendencia a sobreirrigar, en el sentido que se dan pocos riegos y mucho volumen, sin embargo debido a la capacidad de retención del sustrato, solo una pequeña parte de esta es aprovechada por la planta. Por lo que se recomienda incrementar la frecuencia de riegos a medida que el volumen de sustrato disminuye.

Mediante el balance hídrico es factible estimar los requerimientos de riego de los cultivos bajo invernadero, así mismo mediante lisímetros de balance se considera un dato con buena precisión, estos presentan las ventajas de que son económicos, de fácil instalación y método de medición, y la condicionante mínima es que exista drenaje, es decir un control estricto en la aplicación del riego. Los Lisímetros de balance, con un manejo adecuado son una herramienta robusta para determinar el volumen de riego.

Bajo las densidades, tipo de invernadero y características de manejo establecidas en el centro de México (4 pl m^{-2}), el sistema productivo del tomate bajo invernadero presenta una productividad del agua, cultivo y calidad del fruto por arriba de los obtenidos a cielo abierto. Los resultados obtenidos por Flores (2005) muestran que la evapotranspiración del cultivo varió de $200 \text{ ml planta}^{-1}$ en las etapas iniciales hasta 1500 ml en la etapa de máxima demanda. El volumen acumulado por planta fue de 110 litros con una productividad del agua de 35 Kg m^{-3} de agua bruta aplicada, y un consumo de 22.06 litros para producir un kilo de tomate.

El uso de sensores de flujo de savia aplicados a cultivo de tomate en invernadero es un método confiable para la estimación de transpiración (**Figura 7.17**), y por lo tanto es viable para ajustar la programación del riego diario en tiempo real, siendo esta su principal ventaja, no obstante su elevado costo y un mayor conocimiento electrónico para su instalación y manejo.



Figura 7.17 Sensor de flujo de savia para determinar el momento del riego.

El uso del tanque evaporímetro tipo “A” dentro del invernadero presenta restricciones para el cálculo de la evapotranspiración, al estar fuertemente influenciado por la cercanía del cultivo, las variaciones temporales de la humedad relativa debido a la evolución transpirativa del tomate y las bajas tasas de ventilación, derivan en una deficiente técnica para el cálculo, por lo que su uso depende de otras técnicas complementarias.

El método de la radiación es útil para definir la frecuencia de riego, una vez que se conoce experimentalmente la cantidad total de agua requerida, usando datos de radiación es posible identificar número de riegos y horario de aplicación, haciendo la mayor adecuación de la demanda evapotranspirativa (continuo) a la aplicación del riego (discreta).

Es necesario mejorar las metodologías tradicionales de aplicación del riego de baja frecuencia y espacios radiculares reducidos. De acuerdo al programa convencional del riego en invernaderos que se tiene, una manera de hacer más eficiente el uso del agua, es aumentar el número de riegos y hacer periodos más cortos en las horas de

máxima incidencia radioactiva. Además que es necesario mejorarlo con la aplicación adicional de un riego fuera del calendario establecido, dependiendo de las condiciones climáticas, por ejemplo en días soleados, hay que aplicar un riego similar por la noche, cuando el sol se ha ocultado y en días nublados (baja radiación), es conveniente aplicar el riego al inicio del día, prácticamente con la salida del sol.

7.8 SOPORTE DE LA PLANTA (MEDIO DE CULTIVO)

En Europa, Canadá y EU el 95% del cultivo de tomate en invernadero se desarrollan en artificial e inerte sustrato. Algunas veces estos sistemas son referidos como “Hidroponía” sin embargo, este término se refiere a sistemas como el llamado NFT (Nutrient Film Technique) en el que ningún sólido es usado para el crecimiento de las plantas,

El cultivo en sustrato también conocido como hidropónico se inicia a finales del siglo XIX con fines experimentales y con una aplicación práctica relativamente reciente. Desde un punto de vista eco-compatible, el sustrato supone evidentes ventajas, precisamente por su condición de aislamiento del suelo o terreno natural, aunque hay que oponer ciertos inconvenientes en cuanto al origen y acopio de los materiales necesarios para su preparación, así como las características de los residuos que pueden generarse en algunos casos una vez utilizados aquellos (**Figura 7.18**).



Figura 7.18 Diversas técnicas usadas como medio de cultivo, aeroponía, hidroponía, acuaponía, etc.

Así por ejemplo, el empleo de lana roca supone eliminar entre 60 y 80 m³ ha⁻¹ de dicho material cada dos años. La lana roca no es biodegradable y sus residuos son nocivos para la salud humana (Benoit, 1990). No sucede lo mismo con los restos de sustratos orgánicos que si son biodegradables y pueden incorporarse al suelo.

Se define a la hidroponía como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en el agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material generalmente inerte y estéril, o simplemente la misma solución nutritiva, con el objeto de proporcionar las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal (**Figura 7.19**).

Puede inclusive no mediar ningún sustrato quedando las raíces inmersas en la solución nutritiva o inclusive suspendida en el aire. La hidroponía como un sistema de producción de flores y hortalizas es, desde hace más de tres décadas, una realidad en el ámbito mundial.



Figura 7.19 Sistema hidropónico con movimiento circular.

El interés por esta técnica en el ámbito mundial obedece fundamentalmente a los altísimos rendimientos que por unidad de superficie se pueden obtener (100 a 1000% más que el cultivo convencional en suelo) y a la mejor calidad de los productos obtenidos (lo que significa mejor mercado y precio de venta).

Ello es debido fundamentalmente al logro de un balance ideal entre el oxígeno para la respiración de la raíz, el agua y los nutrientes; a la ausencia total de malas hierbas, al mayor control que se tiene sobre plagas y enfermedades, al mantenimiento del pH dentro de un rango óptimo, y a que se permite una mayor densidad de población.

Como ventajas adicionales se pueden mencionar: mayor precocidad en los cultivos; ahorro de agua y fertilizantes, posibilidad de usar aguas duras y/o relativamente salinas; posibilidad, aunado a los invernaderos, de varias cosechas al año.

En el mundo se han desarrollado muy diferentes modalidades de cultivos hidropónicos a escala comercial, éstas se pueden agrupar convencionalmente en tres categorías:

- a) **Cultivo en solución.**- No hay sustrato; las raíces de las plantas se encuentra sumergidas total o parcialmente en la solución que tiene los elementos nutritivos, lográndose la oxigenación por diferentes mecanismos (sumergiendo sólo parte de la raíz, burbujando oxígeno, dejando la raíz en el aire asperjándole la solución a intervalos. La técnica de la película nutritiva y la aeroponía son dos modalidades recientes.
- b) **Cultivo en grava.**- Comprende a todas aquellas modalidades que utilizan como sustrato a las gravas comunes (en diámetros generalmente de 4 a 20 mm.) y a otros sustratos semejantes tales como tezontles, piedra pómez, ladrillo quebrado, etc. Aquí el principal problema no es la oxigenación sino el abastecer continuamente de agua (solución) a la raíz lo que se logra con riegos muy frecuentes (4 a 10 veces al día). requiriéndose en general de grandes cisternas y de un poderoso bombeo continuo, por lo que cada vez se usa menos.
- c) **Cultivo en agregado.**- Se refiere a modalidades que utilizan sustratos de partículas pequeñas (menores de 3 mm) con propiedades de retención de humedad pero que a la vez permiten suficiente aireación a la raíz, agrolita, vermiculita, peat-moss (turba de pantano), lana de roca, espumas sintéticas, arenas, aserrín, etc. son ejemplos de sustratos que corresponden a esta categoría, que es la forma de hidroponía que más se practica a escala mundial.

De estos la forma más utilizada son los cultivares en sustratos en sus diversas modalidades, se denomina sustrato a un medio sólido inerte que cumple 2 funciones esenciales:

- Anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles respirar, y,
- Contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan

Destacan los siguientes:

a) **Orgánicos:** Cascarilla de arroz, la viruta y el aserrín de madera, la cáscara de coco. Estos sustratos no se recomiendan para el cultivo hidropónico, ya que no son duraderos y, al degradarse, pueden obstruir el paso de la solución nutritiva o del oxígeno. Además, pueden contaminar con facilidad al pudrirse, desarrollando hongos o lama.

b) **Naturales:** La grava, la arena, el tezontle, piedra pómez con carbón mineral, piedra volcánica (como el basalto), perlita, vermiculita, ladrillo triturado, tejas molidas (libres de elementos calcáreos o cemento).

c) **Sintéticos:** Hule espuma, el “tecnosport”, los pelets o esponjas de polipropileno (trozos de plástico), poliuretano, poliestireno, polietileno, etc.



Figura 7.20 Turba usada como sustrato.

Pero cualquiera que sea este debe estar formado por tres fases; sólida, líquida y gaseosa. Con fines de riego, la fase líquida es la más importante ya que define la disponibilidad de agua para las plantas, sirven de soporte a la solución nutritiva y sus conocimientos desde los puntos de vista energético e hidráulico permite de un modo práctico establecer las dosis y frecuencias de riego.

Para que un sistema de cultivo sin suelo pueda ser empleado a nivel comercial, es necesario que permita el desarrollo de la raíz en perfectas condiciones, de manera que debe aportar principalmente, de forma óptima los siguientes elementos:

- **Aireación:** la raíz obtiene la energía que necesita por medio de la respiración quemando carbohidratos, y requiere por tanto disponer del oxígeno necesario para ello. Después de cada riego, y una vez establecido el equilibrio hídrico, deberá quedar en el medio suficiente aire para asegurar el suministro de oxígeno. Las necesidades

dependerán de la intensidad respiratoria, que es función de la temperatura, la fase de desarrollo, etc, pero en cualquier caso se requiere que un mínimo de un 20-30 % del espacio útil quede ocupado por aire en sistemas que utilizan sustrato.

- **Agua:** deberá estar continuamente disponible para la planta en condiciones de extracción muy favorables. El volumen y la configuración de espacios condicionará la frecuencia y dosis de riego.
- **Solutos:** entre los elementos químicos disueltos deberán encontrarse todos los necesarios para la nutrición de la planta en cantidades suficientes para prevenir las carencias, pero no excesivas para evitar niveles altos de presión osmótica a vencer por la raíz.
- **Temperatura:** deberá ser la apropiada para asegurar una óptima actividad biológica en la raíz. Si es excesivamente baja, ésta se ralentizará y, si es demasiado alta, el exceso de actividad acarreará un despilfarro de energía. Incluso, si se sobrepasan ciertos valores extremos, la raíz muere. Influye directamente en la nutrición y el crecimiento vegetal, en el proceso de compostaje y en el cálculo energético de la desinfección al vapor.

7.8.1 Curva característica de retención de agua

La retención de agua en el sustrato generalmente se determina mediante embudos de succión, obteniendo la curva de liberación (o retención de agua) del sustrato o curva característica de humedad, generalmente tensiones entre 0 y 100 cm de columna de agua (0 a 10 kPa de potencial) y en secado, es decir, ejerciendo una presión o fuerza para que el agua fluya hacia fuera del sustrato. Las curvas de retención de agua relacionan el potencial matricial (Presión hidrostática debido a la columna de agua existente por encima del punto en cuestión, Ψ_m) con el contenido de agua (relación entre volumen de agua y volumen aparente del sustrato, θ) del sustrato.

La relación entre el potencial matricial y el contenido de agua es una relación no lineal que depende del sustrato. Para conocer el contenido relativo de agua del sustrato, es necesario determinar el contenido de agua a saturación (θ_s), que suele determinarse en los mismos embudos de succión por inmersión de la muestra en agua. Sin embargo en los sustratos, por dificultad de determinar el punto de saturación por inmersión en agua, suele partir de la porosidad total o efectiva como punto de saturación, que suele calcularse a partir de la densidad aparente y de la densidad real del sustrato.

Este cálculo puede comportar un error importante, puesto que generalmente queda aire atrapado entre o en las partículas del sustrato, además de la posible presencia de porosidad cerrada en la determinación de la porosidad total. El contenido de agua a saturación suele variar en los sustratos entre el 80 y 100% de la porosidad efectiva, dependiendo del material.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es la capacidad del sustrato para conducir el agua. Es importante que el flujo de agua hacia las raíces de las plantas sea elevado con el fin de reponer el agua perdida por transpiración. La conducción del agua en un medio poroso depende de la configuración especial de los poros y continuidad de los mismos (percolación) y de su geometría, a la vez que depende del material que forma la matriz del sustrato.

De manera similar, los sustratos y el suelo, están constituidos por dos elementos principales, *materiales sólidos y espacios porosos* por los que circulan líquidos y gases alternativamente. El conocimiento de estas propiedades tiene significancia sensible en el sistema de producción en invernaderos y en general para todas las plantas.

La fase sólida

La fracción sólida de los sustratos varía del 75% del volumen en algunas arenas a menos del 10% en materiales como lana de roca y turba de pantano, conocida como peat moss. El porcentaje de la fracción sólida depende del tamaño de las partículas y del grado de compactación de los materiales, mientras más compactado está un material mayor será la fracción sólida, por el contrario, los sustratos con una alta porosidad son de consistencia esponjosa y tienen menor porcentaje de su volumen ocupado por partículas. Dependiendo del tamaño y cantidad de poros los materiales pueden retener gran cantidad de agua o drenarla rápidamente, lo primero ocurre si los poros son pequeños y lo segundo cuando los poros son grandes.

La fase líquida

La fase líquida está determinada por la cantidad de agua que puede retener un material, en función de la porosidad y la facilidad o dificultad de adhesión del agua a las partículas de cada uno de los materiales. La solución acuosa dentro de los sustratos tienen gran importancia ya que de ella depende el suministro de agua y nutrientes a las plantas.

Los poros o espacios vacíos de los sustratos se dividen en dos tipos. Porosidad de aireación y porosidad capilar, la primera está integrada por poros grandes y la segunda por poros pequeños, llamados capilares. La capacidad de retención de agua de un material está en función de la cantidad de poros capilares que contenga y la capacidad de aireación del mismo, están determinadas por los poros grandes.

Un material no siempre contiene la misma cantidad de agua, ésta presenta variaciones con el transcurso del tiempo, las condiciones ambientales y el desarrollo de los cultivos. Así el agua dentro de un sustrato, durante su empleo, pasa por varias etapas en la que la disposición de la misma, para las plantas, varía de un estado de máxima disponibilidad después de un riego, a un estado de escasez total si se deja de regar.

7.8.2 Los tipos de agua en los sustratos

De Boodt y sus colaboradores en la Universidad de Gante en Bélgica, a principios de la década de los sesentas, desarrollaron un método para medir la liberación de agua en los sustratos orgánicos, método que se usa en muchos laboratorios para determinar los tipos de agua en los sustratos, y se conoce como “Curva de liberación de agua para sustratos”, se expone en la **Figura 7.21**. En este método, los límites de las curvas fueron establecidos entre 0 y 100 centímetros de tensión. Con ello se definió el sistema para clasificar el agua presente en los sustratos en diferentes rangos o niveles, según la disponibilidad del mismo para las plantas.

Estos niveles son:

- 1) *Agua fácilmente disponible (AFD)*,
- 2) *Agua de reserva (AR)*,
- 3) *Agua disponible (AD)* y
- 4) *Agua difícilmente disponible (ADD)*
- 5) *Agua fácilmente disponible*

El agua fácilmente disponible (AFD), constituye la humedad aprovechable para las plantas, es el agua retenida en los poros, que puede ser extraída fácilmente por las raíces. Esta agua se libera entre los 10 y 50 cm de tensión y se encuentra entre capacidad de contenedor o capacidad de sustrato y agua de reserva.

El agua contenida a capacidad de sustrato es la que se encuentra retenida a tensiones de 10 cm o menos, después de que el agua de gravedad drene libremente. Se considera como rango óptimo, de agua fácilmente disponible, entre el 20 y 30% del volumen del sustrato.

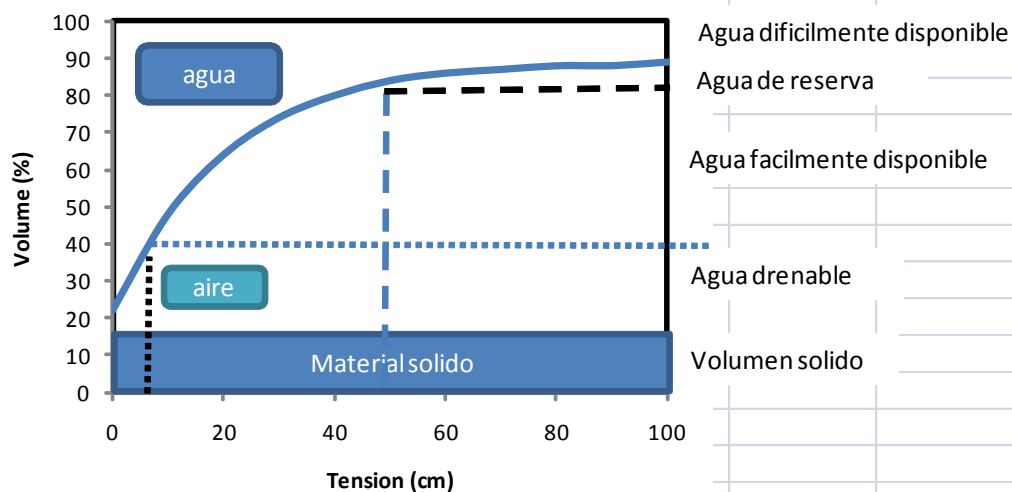


Figura 7.21 Curva característica de retención de agua de un sustrato. (De Boodt et al., 1974; Handreck y Black, 1991)

Agua de reserva

El agua de reserva (AR), representa el porcentaje, en volumen de agua, que se libera entre los 50 y 100 cm de tensión sobre el sustrato. Agua que llegan a aprovechar las plantas extrayéndola con mayor grado de dificultad que la anterior. El valor óptimo de este tipo de agua se encuentra en un rango del 4% al 10% del volumen que ocupa un sustrato.

Agua disponible

El agua disponible (AD) para las plantas constituye el agua fácilmente disponible y el agua de reserva, esto es el total de agua que se encuentra entre los 10 y 100 cm de tensión. Su rango óptimo se establece entre los 24 y 40% del volumen que ocupa el sustrato en un contenedor.

Agua difícilmente disponible

El agua difícilmente disponible (ADD) constituye el agua retenida, dentro de los microporos de un sustrato, tras aplicar una tensión de 100 cm. Esta fuerza es superior a la que puede utilizar las raíces de las plantas para extraer el agua, por lo tanto no puede ser aprovechada por los cultivos.

Agua de gravedad o saturación

El agua de gravedad o saturación, es aquel porcentaje de agua que ocupa los poros grandes de un material en estado de inundación, que drena rápidamente por la acción de la gravedad.

7.9 TEZONTLE COMO SUSTRATO

El tezontle, es una arena volcánica, formados por fragmentos y partículas de lava porosa y poco pesada con alto contenido silicatos de aluminio. Es un material económico que se encuentra en grandes depósitos presentes en todos aquellos lugares donde existen volcanes. En México abundan principalmente en el eje neovolcánico. El tezontle puede ser de color rojo, negro o amarillo, los tres son buenos para emplearse como sustrato en la hidroponía.



Figura 7.22 Cultivo de tomate en sustrato de tezontle.

En la **Figura 7.23** se muestra la curva de retención de humedad, la cual define las tensiones de retención del agua en el suelo y por consecuencia, la cantidad de energía necesaria para que la raíz pueda absorber el agua (y nutrientes) del sustrato.

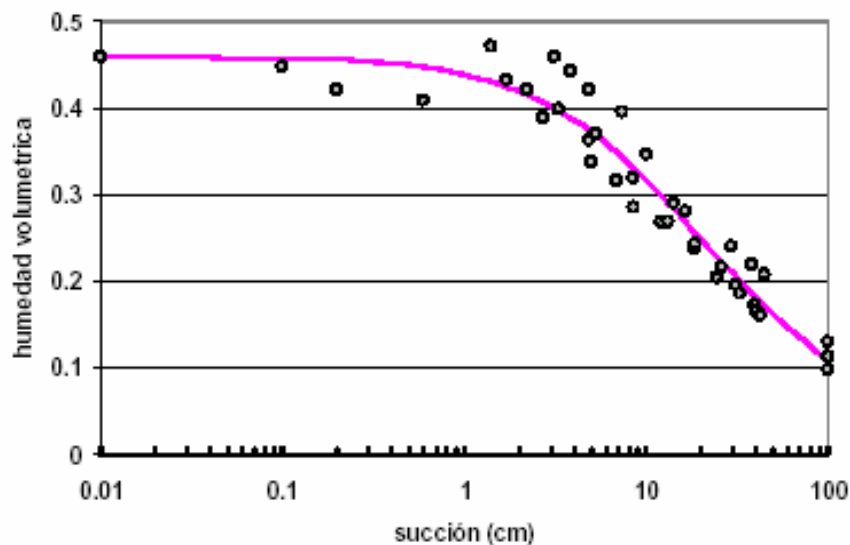


Figura 7.23 Curva de retención de humedad para sustrato de tezontle (Ojeda, 2004).

En general, el tezontle en su estado natural presenta partículas de tamaño variable, tiene buena aireación, la retención de humedad está en función del tamaño de partículas; tezontles de partículas pequeñas presentan alta retención de humedad, partículas grandes baja retención.

La curva indica que a una succión de 50 cm., el sustrato ha perdido la mayor parte de la humedad (**Figura 7.23**), lo cual explica la necesidad de aplicar riegos más frecuentes con un menor volumen, para evitar que la planta invierta grandes cantidades de energía, misma que puede utilizar para otros procesos.

En general presentan buen drenaje, la densidad aparente va de media a alta; con poco aporte de nutrientes, baja capacidad amortiguadora de cambios de pH, contenido de sales variables, baja capacidad de intercambio catiónico, porosidad del 65 al 70%, con alta porosidad interna, pH de neutro a alcalino; de 7.5 a 8.6, aunque también existe con pH ácido, generalmente está libre de sustancias tóxicas. Tiene buena estabilidad física, presenta variaciones considerables de temperatura, puede mezclarse con otros materiales con diferentes proporciones como se observa en el **Tabla 7.3**.

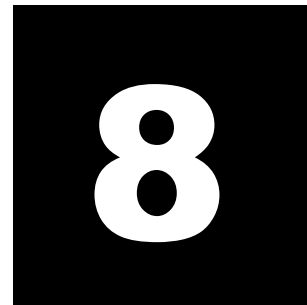
Tabla 7.3 Principales características físicas y químicas del tezontle. (Burés, 1997)

Parámetro y unidad de medida	Valor (b)
Densidad aparente (g/cm ³)	0.77
Densidad real (g/cm ³)	2.65
Espacio poroso total (Volumen en %)	70.94
Capacidad de absorción de agua (g de agua/100g de materia seca)	-
Material sólido (Volumen en %)	-
Aire (Volumen en %)	48.45
Agua fácilmente asimilable (Volumen en %)	6.55
Agua de reserva (Volumen en %)	1.63
Agua difícilmente asimilable (Volumen en %)	14.31
PH	4.6
Conductividad eléctrica	0.02
Contenido de elementos extractables (mg/l)	
Nitrógeno	6
Fósforo	9
Potasio	52
Calcio	330
Magnesio	25

La estructura interna de un material determina la porosidad así como la densidad real y aparente, mientras que el tamaño de partículas o granulometría y el tipo de empaquetamiento determinan la distribución y tamaño de los poros. La densidad aparente está en función de la distribución espacial y de la estructura interna del material. La porosidad es la suma de los poros internos y externos, de ella dependen propiedades como la retención de agua y la permeabilidad o drenaje (Burés, 1997).

*"No se aprecia el valor del agua hasta que se seca el pozo."
Proverbio inglés.*

La calendarización del riego del cultivo de maíz



CAPITULO 8

LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO DEL CULTIVO DE MAÍZ

Ernesto Sifuentes Ibarra, Waldo Ojeda Bustamante y Jaime Macías Cervantes

8.1 INTRODUCCIÓN

La agricultura es el mayor usuario de agua en las áreas de desarrollo y por consiguiente enfrenta el reto de utilizar este recurso en forma eficiente ante presión por su uso por otros sectores. La agricultura bajo riego en nuestro país se encuentra en transición pasado de la fase de expansión a la fase de maduración donde la optimización de los recursos como el agua es de suma importancia ante su limitada, costosa e incierta disponibilidad.

El maíz es por mucho el cultivo más importante de México desde el punto de vista alimentario, industrial, político y social, la superficie sembrada promedio anual es de 8.4 millones de hectáreas, de las cuales el 85.5% es de temporal (7.2 millones de hectáreas), mientras que 1 millón 217 mil hectáreas se siembran bajo condiciones de riego (14.5%), de las cuales Sinaloa es el principal productor al establecer anualmente alrededor de 400,000 ha con una producción de más de 4 millones de toneladas (CONAGUA, 2008). Aunque México es uno de los principales productores de maíz a nivel mundial, su demanda es superior a su producción, por lo que es uno de los principales países importadores con más de 7 millones de toneladas anuales (SIAP-SAGARPA, 2009). El cultivo de maíz ha mostrado un incremento consistente en su rendimiento y superficie cosechada como se muestra en la **Figura 8.1**.

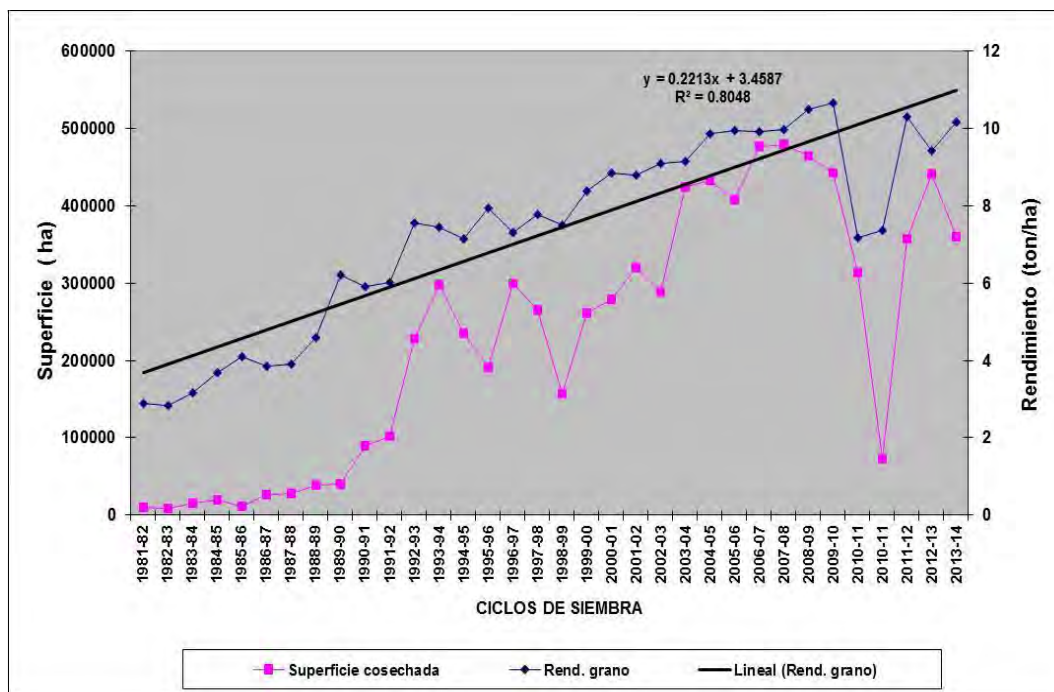


Figura 8.1 Evolución de la superficie sembrada y rendimiento de maíz en Sinaloa de 1981 a 2014.

En los últimos años se ha observado alta variabilidad climática en las principales zonas productoras de México, provocado alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos e incremento en la presencia de eventos extremos sequías y heladas. Ante tal situación cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos principalmente el riego y nutrición, haciéndose necesario tecnologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos, como el desarrollo de aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros, ya que cada vez estos tienen más acceso a dichos medios.

Desafortunadamente la agricultura tradicional está ligada a la cultura del uso excesivo de insumos y recursos como agua, así como y a la práctica de monocultivos como maíz en Sinaloa y trigo en Sonora, provocando que esta actividad sea cada vez menos rentable y riesgosa.

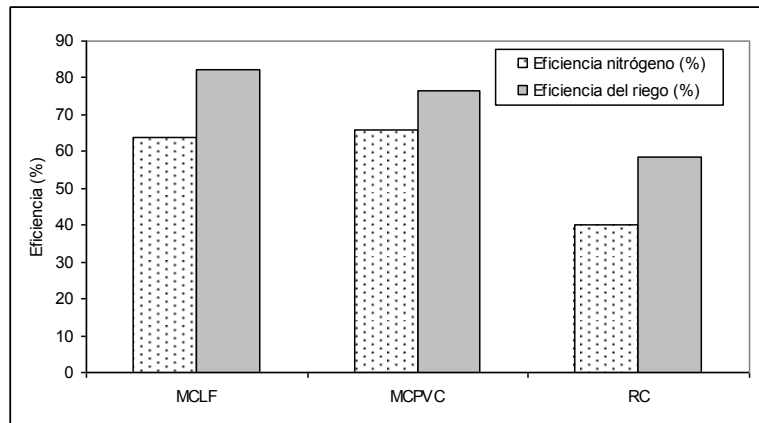


Figura 8.2 Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (MCLF y MCPVC)

En los últimos años el precio del maíz ha mantenido una tendencia a la baja, siendo más crítica para el ciclo otoño-invierno 2014-15, no así los costos de producción, los cuales se han incrementado, disminuyendo la rentabilidad del cultivo y con ello el margen de utilidad que el productor percibe. Debido a lo anterior, una de las alternativas es encontrar la combinación ideal de prácticas que permitan mejorar la eficiencia de producción, es decir, producir el máximo rendimiento al menor costo posible por unidad de superficie, sin menoscabo de la calidad ambiental. La eficiencia del nitrógeno está asociada a la eficiencia del riego (**Figura 8.2**)

8.2 LA IMPORTANCIA DEL RIEGO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ

8.2.1 Factores limitantes de la producción

La producción de los cultivos es afectada por una gran diversidad de factores relacionados con el cultivo, suelo, clima, así como diferentes prácticas agronómicas y utilización variable de insumos en cantidad y oportunidad, conformando con ello en su conjunto a la tecnología utilizada en cada condición o parcela, por lo cual, las diferencias tecnológicas están dadas por las mismas diferencias en el manejo agronómico del cultivo, a juicio del productor (**Figura 8.3**).

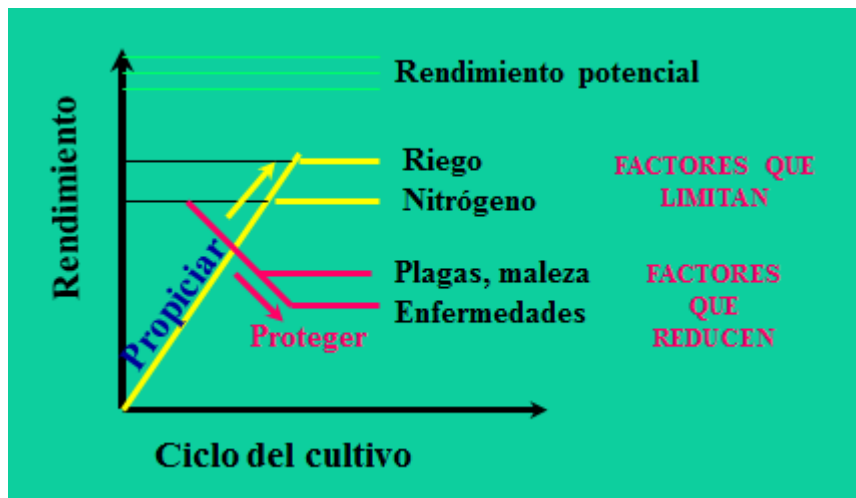


Figura 8.3 Factores limitantes de la producción

8.2.2 Factores asociados a la calendarización del riego

El clima, el suelo y la fenología del cultivo son probablemente los factores más importantes relacionados con la calendarización del riego que determinan los requerimientos hídricos de los cultivos en una zona de riego. De las condiciones temporales del clima dependen la mayoría de las funciones fisiológicas de las plantas como fotosíntesis, respiración, transpiración y absorción de nutrimentos. Las principales variables climáticas que se han asociado a los requerimientos de agua de las plantas son: radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. En las zonas de riego más importantes de México como los valles de los distritos del noroeste, la temporada de siembras para un ciclo otoño-invierno (donde se establece principalmente el cultivo de maíz) es muy amplia, comprende desde octubre hasta diciembre, por lo que no es posible generalizar la programación del riego, debido a las drásticas variaciones climáticas presentes en este periodo.

Aunque existen muchas propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo, las que tienen una relación más directa con la calendarización del riego son: 1) Textura, 2) Densidad aparente y 3) Materia orgánica. Sin embargo, no se debe descartar la influencia de sales en los programas de riego, para lo cual es importante monitorear la conductividad eléctrica y el pH.

La fenología de los cultivos es quizá el factor biológico más importante en la calendarización de los riegos. Aunque es común definir las etapas en días calendario, este concepto adolece de precisión al cambiar las condiciones climáticas de las existentes cuando fueron definidas. Por ejemplo, ciclos más fríos retardarán el desarrollo fenológico, mientras que ciclos más calientes los aceleran. Ante esta variación se tendría desfase de la duración pronosticada y observada para cada una de las etapas fenológicas.

Para superar esta limitante se ha introducido el concepto de tiempo térmico o grados día ($^{\circ}\text{D}$) que asume que se requiere una cantidad de energía térmica para el desarrollo y crecimiento de muchos organismos. El tiempo requerido para acumular esa cantidad de calor varía temporalmente y espacialmente. Si los $^{\circ}\text{D}$ son usados como un estimador de las etapas de desarrollo de la planta, el rango de temperaturas (temperaturas mínima y máxima) es definido como el rango en el cual la planta crece, fuera de este rango la planta deja de crecer o muere. En la **Figura 8.4** se presentan los valores de $^{\circ}\text{D}$ acumulados a los cuales se aparecen las diferentes etapas fenológicas de las principales variedades de maíz de ciclo intermedio sembradas en el norte de Sinaloa.

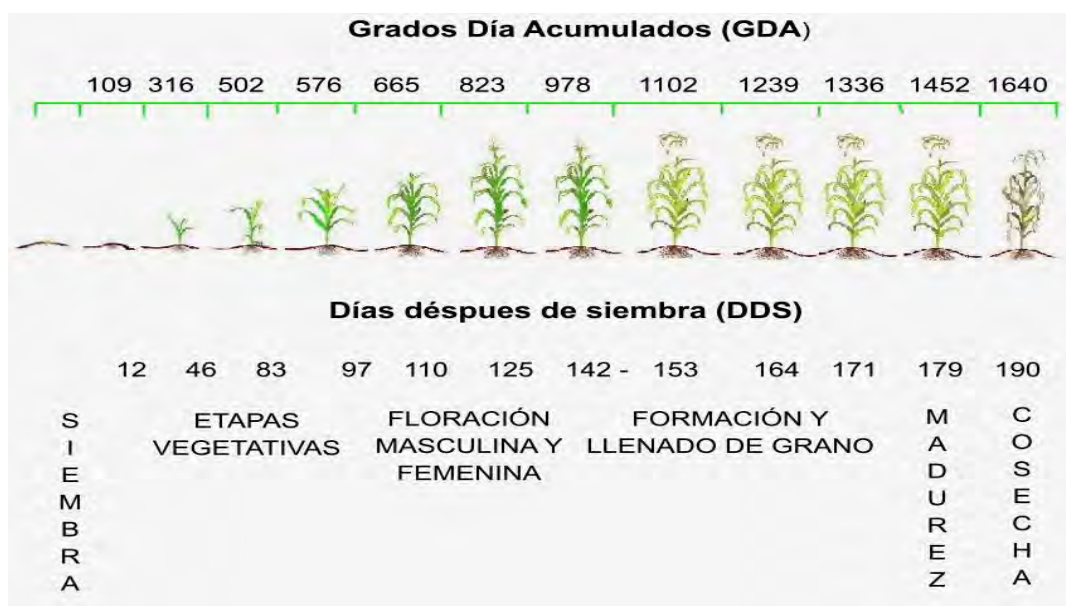


Figura 8.4 Fenología del cultivo de maíz y su relación con el tiempo térmico o grados día ($^{\circ}\text{D}$) (Ojeda y Sifuentes, 2006).

De acuerdo a Doorembos y Kassam (1986) reportaron que el requerimiento potencial total de agua del maíz, es de 500-800 mm distribuida de acuerdo a sus fases fenológicas. Las fases de floración y llenado de grano son las más críticas para obtener la máxima producción. Aceves, *et al.* (2008) mencionan que en el maíz la disponibilidad de agua en el momento oportuno, es el factor más crítico para determinar el rendimiento. El periodo con mayor exigencia de agua, es el que va desde 15 días antes de la floración hasta 30 días después. Un estrés causado por deficiencia de agua en el periodo de floración puede ser motivo de una merma del 6 al 13% por día, en el rendimiento final. El maíz es uno de los cultivos con mayor requerimiento de riego en el norte de Sinaloa, México (**Tabla 8.1**). Siendo el riego por gravedad el principal sistema de aplicación del riego, el uso eficiencia del riego es un reto actual ante una alta variabilidad de la disponibilidad de agua.

Tabla 8.1 Requerimientos hídricos totales (netos y brutos) de los principales cultivos en el norte de Sinaloa en función del tipo de sistema de riego.

Cultivo	Lámina neta	Lámina bruta (cm)		
	(cm)	Gravedad	Aspersión	Goteo
Maíz	45	75	56.3	50
Fríjol	28	46.7	35	31.1
Trigo	31.9	53.2	39.9	35.4
Garbanzo	25.4	42.3	31.8	28.2
Algodón	65.7	109.5	82.1	73
Cártamo	25	41.7	31.3	27.8
Papa	36	60	45	40
Tomate	28.8	48	36	32
Chile jalapeño	36.3	60.5	45.4	40.3
Calabaza	10.5	17.5	13.1	11.7
Maíz dulce	21.8	36.3	27.3	24.2
Sorgo	31.6	52.7	39.5	35.1
Soya	33.7	56.2	42.1	37.4
Caña de azúcar (planta)	150	250	187.5	166.7
Caña de azúcar (soca)	110.1	183.5	137.6	122.3
Mango	92.7	154.5	115.9	103

8.3. MÉTODOS DE CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

8.3.1 La planta como indicador

En la programación del riego del maíz se han utilizado diversos métodos: determinación de la humedad del suelo, mediciones del estado energético del agua en el suelo, estimaciones de la demanda atmosférica y determinaciones del potencial hídrico de las plantas (Buchner et al., 1994). Otros, se basan en comparaciones visuales del crecimiento de la planta referentes a su etapa fenológica y las características que dicha planta debe de presentar en dicha etapa (**Figura 8.5**).

**Figura 8.5** Plantas de maíz con efectos contrastantes de estrés hídrico visual.

8.3.2 El suelo como indicador

Para la programación de riegos el suelo actúa como un reservorio de agua, ya que ésta se aplica en la frecuencia y la cantidad necesaria para mantener la humedad del suelo adecuada para obtener altos rendimientos sin lavar fertilizantes. El nivel recomendado es la capacidad de campo (CC) como se muestra en la **Figura 8.6**.

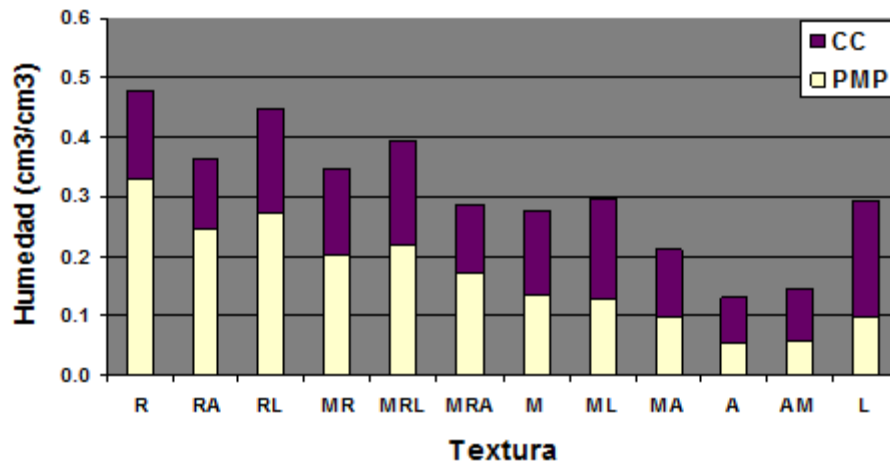


Figura 8.6 Constantes hídricas por textura del suelo (Sifuentes *et al.*, 2013), adaptado de Rawls y Brakensiek (1983). (R = arcilla, L=limo, A=arena, M=Franco).

La limitante de este método es que se requiere monitorear la humedad del suelo en forma constante y asociarla a un criterio de riego (CR), el momento de riego (MR) entonces se calcula:

$$MR = CC - (HA \times CR)$$

Donde CC es la capacidad de campo del suelo y HA es la humedad aprovechable del suelo (CC-PMP) y CR es el criterio de riego. Este varía dependiendo de la etapa y sistema de riego.

El monitoreo de la humedad del suelo se puede realizar desde el método convencional, bloques de yeso, tensiómetros, hasta el uso de dispositivos electrónicos, como reflectómetros (TDR). El monitoreo de la humedad usando sondas de TDR es una práctica cada vez más común en varios módulos de los distritos de riego del norte de Sinaloa (**Figura 8.7**).



Figura 8.7 Monitoreo de la humedad del suelo con TDR y uso de sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para seguimiento del riego a nivel parcelario

8.4 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y TIEMPO TÉRMICO

La incorporación del concepto grados día crecimiento ($^{\circ}\text{D}$) para calendarizar los riegos, ha demostrado ser una excelente herramienta factible de aplicar tanto en parcelas, y en grandes zonas de riego, aún bajo condiciones variables de clima y de disponibilidad de agua, a esta metodología Ojeda *et al.* (2006) la denominaron programación integral del riego.

El objetivo de la programación integral del riego es generar automáticamente y en tiempo real programas de riego de acuerdo a la fenología del cultivo y suelo, aún bajo condiciones variables de clima, usando el concepto días grado crecimiento. Ojeda, *et al.*, (2006) generaron en el Valle del Fuerte para el cultivo de maíz, los parámetros de programación integral: coeficiente de cultivo (K_c), Profundidad dinámica de la raíz (R_d) y factor de abatimiento (F) expresándolos mediante modelos matemáticos, los cuales pueden ser programados en sistemas computacionales.

El **Tabla 8.2** muestra los requerimientos hídricos y tiempo térmico por etapa de una variedad de maíz ciclo intermedio en Sinaloa,

Tabla 8.2 Consumo de agua promedio (ET_r) por etapa fenológica para una variedad típica sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa con requerimientos a madurez de 1451°D .

Etapa	Clave	Consumo de agua promedio (mm)			Duración etapa			
		diario	etapa	acumulado	Días	DDS	$^{\circ}\text{D}$	$\Sigma^{\circ}\text{D}$
Emergencia	Ve	0.59	7.07	7.07	12	12	109.42	109.42
4-hojas	V4	0.63	21.57	28.64	34	46	207.01	316.43
8-hojas	V8	1.41	52.23	80.87	37	83	185.54	501.97

Etapa	Clave	Consumo de agua promedio (mm)			Duración etapa			
		diario	etapa	acumulado	Días	DDS	°D	Σ°D
12-hojas	V10	2.50	35.01	115.88	14	97	74.11	576.08
Flor masculina	VT	3.03	39.33	155.21	13	110	89.11	665.19
Jiloteo	R1	4.47	66.98	222.19	15	125	158.27	823.46
Grano acuoso	R2	4.87	82.85	305.04	17	142	155.09	978.55
Grano lechoso	R3	4.32	47.54	352.58	11	153	123.70	1102.25
Grano masoso	R4	4.34	47.75	400.33	11	164	137.50	1239.75
Grano abollado	R5	2.97	20.79	421.12	7	171	95.78	1335.53
Madurez	R6	1.85	14.82	435.94	8	179	115.59	1451.12
Cosecha	-	0.81	8.89	444.83	11	190	189.64	1640.76

El sistema de riego y la capacidad de almacenamiento definen grandemente la frecuencia del riego. Para suelos arcillosos y francos arcillosos estableciendo el cultivo en la última decena de noviembre, los calendarios de riego recomendados para riego por gravedad y aspersión son los de los **Tablas 8.3 y 8.4**.

Tabla 8.3 Calendario de riego en maíz con riego por gravedad.

Riego (numero)	Intervalo (días)	Días después de siembra	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	235.0
2	84	64	424.72	44.5	74.2
3	34	98	580.13	73.7	122.8
4	23	121	778.48	86.1	143.4
5	30	141	980.00	96.9	161.5
Total				442.2	736.9

Nota: 1 mm representa 10 m³/ha (diez mil litros por hectárea)

Tabla 8.4 Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal).

Riego (numero)	Intervalo (días)	Días después de siembra	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	165.1
2	50	30	225.5	15.6	18.3
3	38	68	442.8	36.4	42.8
4	20	88	527.5	42.9	50.4
5	19	107	635.4	49.8	58.5
6	13	120	766.1	52.6	61.9
7	12	132	890.2	56.9	66.9
8	13	145	1011.9	61.1	71.9
Total				456.2	535.8

En riego por goteo, el requerimiento de riego acumulado es del orden de 55 cm, aplicando alrededor de 20 riegos, con un intervalo máximo de 25 a 30 días (primer auxilio), intervalo medio de 5 a 6 días y un mínimo de 3 a 4 días.



Figura 8.8 Sistemas de riego para la producción de maíz.

La fecha de siembra también influye en la calendarización del riego. Con el uso de sistemas computacionales basados en el concepto de grados día ($^{\circ}\text{D}$) es posible analizar diferentes fechas de siembra para definir la mejor temporada de siembra desde el punto de vista de requerimientos de riego para una región determinada. En el **Tabla 8.5** se puede observar la variación de los requerimientos de riego de maíz en el valle del Fuerte, Sinaloa. Siembras de octubre requieren 50 mm menos agua que las siembras de diciembre y su ciclo fenológico se reduce 25 días.

Tabla 8.5 Requerimientos de riego de siembra a madurez fisiológica del maíz en diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte.

Fecha de Siembra	Duración del Ciclo (días)	ET _o (mm)	ET _r (mm)	Número de riegos
Sep-15	123	405	277	3
Oct-01	165	505	360	4
Oct-15	176	558	375	4
Nov-01	183	605	435	5
Nov-15	182	633	419	5
Dic-01	176	641	421	5
Dic-15	168	636	433	6
Ene-01	157	622	425	6
Ene-15	148	626	410	5

Desde el punto de vista hídrico, es preferible compactar el periodo de siembras que minimice el consumo de agua sin mermas significativas en los rendimientos convencionales. Considerando rendimiento, disponibilidad del agua y requerimientos de riego del maíz, el mejor periodo de siembras en el norte de Sinaloa se presenta durante la primera mitad del mes de octubre. Siembras anteriores a ese periodo no son recomendables por la incertidumbre en la disponibilidad de agua, mientras que siembras tardías tienen mayores consumos de agua y acortan el intervalo de riegos sin un incremento sustancial en los rendimientos.

8.4.1 Programación integral bajo condiciones de escasez

En los distritos de riego del noroeste de México es común que se presenten escenarios de baja disponibilidad hídrica, ya que esta depende de la presencia de lluvias ciclónicas que se presentan durante los meses de julio a octubre y el programa de siembras se define en junio asumiendo un nivel probabilístico de disponibilidad. Cuando la presencia de lluvias es baja en la cuenca de captación de los sistemas de presas de almacenamiento y se tiene una operación deficiente, el escenario se agrava, lo cual puede provocar la cancelación de segundos cultivos y el ciclo primavera-verano. Por ejemplo, en el módulo Batequis del distrito de riego 075 en promedio se asigna una lámina bruta a nivel de toma granja de aproximadamente 90 cm, con una lámina neta de 44 cm para años normales. Sin embargo, para años secos como el ciclo otoño-invierno 2002-03 la disponibilidad de agua del módulo era casi 20% menor que la lámina normal, por lo que la lámina bruta asignada fue 72 cm.

Para evitar una reducción en la superficie de maíz se generan programas de riegos en condiciones de sequía, con la finalidad de reducir en un riego el total de los aplicados en condiciones normales. En el **Tabla 8.6** se presentan los programas óptimos en dos condiciones de disponibilidad de agua (normal y escasez) para suelos arcillosos y franco-arcillosos típicos en el distrito de riego 075..

Tabla 8.6 Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua.

Número de riegos	Normal				Escasez			
	Ln (mm)	Lb (mm)	(Σ °D)	Etapas	Ln (mm)	Lb (mm)	(Σ °D)	Etapas
1	141	235	-80	Presiembra	141	235	-80	Presiembra
2	54	160	436	V6	72	160	500	V8-V10
3	74	160	616	VT	98	160	747	R1
4	86	160	819	R1	109	160	996	R3
5	91	160	1006	R3				
Total	446	875			420	715		

Ln = lámina neta (requerimiento del cultivo); Lb = lámina bruta (lámina aplicada);

Σ °D = grados día acumulados a partir de siembra

8.4.2 Manejo del último riego

La predicción óptima y manejo del último riego tienen como objetivo principal asegurar la disponibilidad de humedad aprovechable en la zona radical que permita la maduración del cultivo para producir los rendimientos potenciales y finalizando el ciclo con un contenido de humedad tan bajo como lo permita las condiciones de manejo del cultivo al momento de la cosecha. Klocke *et. al.* (1991), definen la madurez fisiológica cuando los granos o semillas han dejado de crecer. En algunos granos como maíz y

sorgo se forma una capa negra en la punta del grano, en otros como soya, su vaina muestra un color de madurez característico.

En los distritos de riego cuando se presentan escenarios de disponibilidad de agua alta, cerca del 50% de la superficie sembrada de maíz se le aplica el último riego cuando el cultivo se encuentra en madurez fisiológica (R6) o en la fase anterior (R5).



Figura 8.9 Aplicación innecesaria del último riego en etapa R5 (grano dentado).

Esta situación representa un desperdicio potencial de 8 millones de m^3 por cada 10,000 ha sembradas, con los cuales sería posible establecer cerca de 1,000 ha de maíz adicionales si se controla el último riego. Mediante la programación integral del riego es posible conocer anticipadamente si la humedad de una parcela en determinado momento será suficiente para que el cultivo llegue a madurez fisiológica. En suelos arcillosos (barrial) y franco-arcillosos, característicos del norte de Sinaloa el último riego se debe aplicar en la etapa R3 (1100 °D). En la **Figura 8.10** se presenta gráficamente una simulación de la predicción del último riego mediante programación integral.

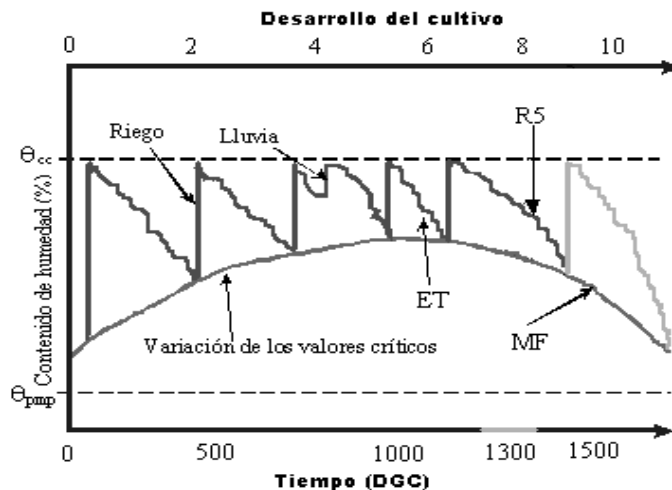


Figura 8.10 Predicción del último riego mediante programación integral.

8.4.3 Tecnologías de información y comunicación (TIC'S)

Con el desarrollo de las comunicaciones (Internet) y la informática, actualmente es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros, ya que cada vez estos tienen más acceso a dichos medios. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda et al., 2006). Bajo este contexto, en los últimos años el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el INIFAP han desarrollado aplicaciones computacionales con tecnologías de información y comunicaciones para productores, módulos de riego y empresas agrícolas. Con estas herramientas con el usuario de una manera sencilla aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real que le permite en forma anticipada programar sus riegos. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa ya que es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir las cantidades de fertilizantes nitrogenados (Sifuentes, 2007).

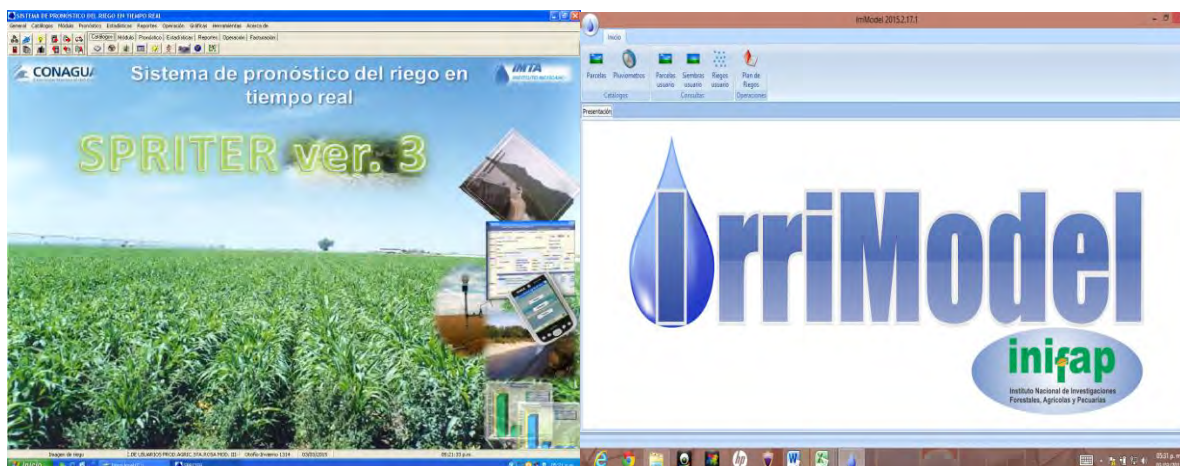


Figura 8.11 Aplicaciones computacionales para la programación integral del riego.

Figura 8.1 Evolución de la superficie sembrada y rendimiento de maíz en Sinaloa de 1981 a 2014..... 256

Figura 8.2 Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (MCLF y MCPVC)..... 257

Figura 8.3 Factores limitantes de la producción 258

Figura 8.4 Fenología del cultivo de maíz y su relación con el tiempo térmico o grados día (°D) (Ojeda y Sifuentes, 2006)..... 259

Figura 8.5 Plantas de maíz con efectos contrastantes de estrés hídrico visual..... 260

Figura 8.6 Constantes hídricas por textura del suelo (Sifuentes *et al.*, 2013), adaptado de Rawls y Brakensiek (1983). (R = arcilla, L=limo, A=arena, M=Franco). 261

Figura 8.7 Monitoreo de la humedad del suelo con TDR y uso de sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para seguimiento del riego a nivel parcelario..... 262

Figura 8.8 Sistemas de riego para la producción de maíz..... 264

Figura 8.9 Aplicación innecesaria del último riego en etapa R5 (grano dentado). 266

Figura 8.10 Predicción del último riego mediante programación integral. 267

Figura 8.11 Aplicaciones computacionales para la programación integral del riego... 268

Tabla 8.1 Requerimientos hídricos totales (netos y brutos) de los principales cultivos en el norte de Sinaloa en función del tipo de sistema de riego. 260

Tabla 8.2 Consumo de agua promedio (ET_r) por etapa fenológica para una variedad típica sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa con requerimientos a madurez de 1451 °D..... 262

Tabla 8.3 Calendario de riego en maíz con riego por gravedad..... 263

Tabla 8.4 Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal). 263

Tabla 8.5 Requerimientos de riego de siembra a madurez fisiológica del maíz en diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte..... 264

Tabla 8.6 Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua.
..... 265

“Agua de mayo, pan para todo el año”

Anónimo

La calendarización del riego en cultivos hortícolas



9

CAPITULO 9

LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Rutilo López López

9.1 INTRODUCCIÓN

La producción de hortalizas en México es de suma importancia por la contribución en el consumo de alimentos de alta calidad y los ingresos económicos que se generan en la comercialización principalmente por los productos de exportación como los tomates, chiles, sandía y otros. En el año 2011, la superficie sembrada de chiles verdes y jitomates en nuestro país fue de 152,742 y 53,780 hectáreas, respectivamente (SIAP, 2012). La mayor parte de la producción proviene de la siembra a cielo abierto, aunque en los últimos años existe una tendencia al incremento de la superficie con agricultura protegida.

En el Sureste de México, la producción de hortalizas, principalmente de chile habanero, tomate de cáscara y sandía, se caracteriza principalmente por cultivarse a cielo abierto, donde se practica la producción de plántulas en contenedores, cubierta plástica y sistema de riego por goteo con fertirrigación. Sin embargo, en los últimos años, la producción hortícola ha disminuido la superficie debido principalmente al manejo irracional del recurso agua y suelo que originan problemas de altos costos de producción aunado al bajo precio de los productos en el mercado y a los problemas de plagas y enfermedades, principalmente de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y el ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*) que ocasionan reducción del rendimiento y la calidad de los frutos. Cabe señalar que existe en la actualidad una superficie de aproximadamente 1000 hectáreas de chile habanero y otras hortalizas como el melón y sandía que se cultivan de temporal (ciclo Primavera-Verano) y humedad residual (Otoño-Invierno) con rendimientos bajos y productos que no poseen la calidad para el mercado de exportación.

La importancia de la programación del riego y el uso eficiente del agua de riego (UEAR) se ha incrementado en los últimos años y el método de riego por goteo es una alternativa que contribuye en forma sustentable el aprovechamiento racional del agua al mejorar las eficiencias de riego para la agricultura. El riego por goteo mejora el UEAR, principalmente mediante la aplicación eficiente del volumen de agua (Stanghellini *et al.* 2003; Jones 2004; Kirnak y Demirtas 2006). Con los sistemas de riego por goteo, el agua y los nutrimentos pueden ser aplicados directamente a la zona radical de los cultivos, teniendo efectos positivos en el rendimiento, ahorro de agua e incremento en las eficiencias de riego (Phene and Howell, 1984).

Para obtener altos rendimientos de cultivos, es necesario el suministro óptimo del agua y humedad del suelo cercana a capacidad de campo (-10 to -30 kPa) durante el período vegetativo. Existe una reducción significativa de rendimiento de frutos cuando hay limitaciones de la cantidad de agua aplicada durante los períodos de crecimiento vegetativo, floración y fructificación (Doorenbos y Kassam, 1986). Della Costa y Gianquinto (2002) mencionan que el riego deficitario (RD) continuo reduce significativamente el peso fresco total del fruto de chiles. El mayor rendimiento comercial fue encontrado con el riego de 120 % de la evapotranspiración; no encontraron diferencias significativas de la producción comercial con el 40, 60, 80 y el 100 % de la evapotranspiración. Antony y Singandhupe (2004) reportaron que la producción total de Chile fue menor en los niveles más bajos de riego (40 % de la ET). Dorji *et al.* (2005) compararon el riego tradicional contra el sistema de goteo con déficit riego (DR) para el cultivo de Chile y encontraron que el ahorro de agua mediante el RD fue aproximadamente el 50 % con respecto del riego tradicional.

Los métodos utilizados en la programación del riego se basan en el conocimiento de las condiciones atmosféricas (estimación de la evapotranspiración), en el control de la humedad del suelo y en el seguimiento del estado hídrico de la planta. En general, estos son de dos tipos: i) Aquellos que consideran como punto de partida para la dosificación del riego, el balance hídrico del suelo calculado a partir de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la aplicación de coeficientes de cultivo, al utilizar los estimadores de contenido de humedad del suelo y de estrés hídrico de la planta como ayuda para la toma de decisiones (Myburgh, 1996); y ii) las estrategias basadas en el seguimiento del contenido de agua del suelo, manteniendo la tensión matricial del suelo por encima de un determinado valor que varía según el estado fenológico del cultivo y los objetivos de producción y calidad deseados (McCarthy, 1998). En este capítulo, se presentan experiencias de la programación del riego basadas en el cálculo de la evapotranspiración de referencia por el método de tanque evaporímetro y coeficientes de cultivos en función de la etapa fenológica generados y evaluados por otros investigadores en los cultivos de chiles y tomates. Asimismo, se monitorea el potencial matricial del suelo por medio de tensiómetros y sensores watermark para complementar la información del momento de riego.

El objetivo del presente capítulo es dar a conocer las aplicaciones de la programación del riego a partir de las necesidades hídricas y manejo agronómico de los cultivos hortícolas para el uso eficiente del agua de riego e incremento de la productividad en la región Sur Sureste del país.

9.2 FACTORES ASOCIADOS CON LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN LAS HORTALIZAS

9.2.1 Clima

Los factores meteorológicos del clima determinan la evapotranspiración del cultivo. Las principales variables climáticas a considerar son: la radiación solar, temperaturas, velocidad del viento, evaporación y la precipitación. Asimismo, se deben considerar algunos parámetros atmosféricos como la presión atmosférica, el calor latente de vaporización, la temperatura del aire, humedad del aire, presión de vapor, temperatura del punto de rocío. Estas variables climáticas se pueden obtener de una estación meteorológica automatizada con registros continuos de cada 10 minutos o a nivel diario (acumulación de 24 horas) para la estimación de la evapotranspiración del cultivo. Existen una diversidad de métodos, el más práctico y sencillo, no por ello impreciso, es la evaporación de tanque tipo "A". En la **Figura 9.1**, se presenta un ejemplo de la variación de las temperaturas máximas y mínimas y su relación con las láminas de riego y precipitación.

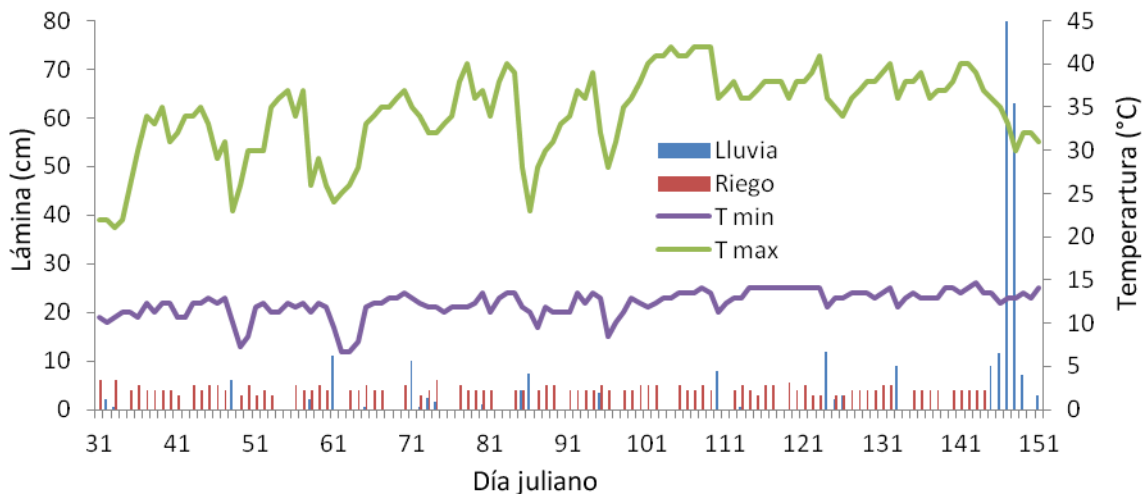


Figura 9.1 Variación de los elementos del clima (temperaturas máxima y mínima y precipitación) y láminas de riego durante el ciclo del cultivo de chile habanero, O-I/2012-2013. Huimanguillo, Tabasco, México.

9.2.2 Calidad del agua de riego

El agua usada para riego de fuentes de abastecimiento con contenidos altos de carbonatos y bicarbonatos pueden ocasionar riesgos de taponamientos de emisores, si no se maneja eficientemente mediante tratamientos químicos (cloración, acidificación) para el mantenimiento del sistema de riego, esto influye directamente en la programación del riego al considerarse una lámina para el lavado y limpieza de las

tuberías y emisores en el sistema. Por ello, también es importante tomar en cuenta el sistema de filtrado según las fuentes contaminantes del agua de riego (**Figura 9.2**).



Figura 9.2 Fuente de abastecimiento de agua superficial para riego y sistema de filtrado de grava y arena.

9.2.3 Especie de cultivo

Las necesidades hídricas y la programación de riegos en los cultivos hortícolas varían según la especie, variedad o híbrido, etapas fenológicas, por lo general, requieren de 5 mm por día en la etapa de floración y maduración, esta es la más crítica debido a que una deficiencia hídrica en el cultivo ocasiona una reducción muy significativa en el rendimiento y la calidad de los frutos.

9.2.4 Suelo

Las propiedades físicas del suelo como la textura, el espacio poroso y la densidad aparente tienen una influencia en la capacidad de retención de humedad o en la relación entre el contenido de humedad y el potencial matricial del suelo. Un suelo de textura arenosa o franco arenosa retiene menos humedad que un suelo de textura arcillosa, esto determina la frecuencia y la lámina de riego en los cultivos. Generalmente, las hortalizas son susceptibles a los excesos de humedad (suelos saturados o sobresaturados) por lo que es importante la construcción de drenaje en los terrenos cultivados, especialmente en la región del Sureste de México. En la sección 9.4 se presentan algunos resultados del efecto de la lámina de riego y la precipitación en la variación de la tensión de humedad del suelo durante el ciclo de los cultivos.

9.2.5 Sistema de producción

El cultivo de hortalizas se practica en diversas condiciones de sistemas de producción con sistemas de riego: cielo abierto, invernaderos, malla sombra y microtuneles. Cada uno de estos sistemas requiere un manejo eficiente de los

componentes de la tecnología de producción: siembra en charolas, cubierta plástica y fertirrigación. A continuación, se describe cada uno de ellos y su relación con la programación y necesidades de riego.

Producción de plántulas en charolas y trasplante. La siembra de semillas se puede realizar en charolas de plástico o poliestireno de 50 a 200 cavidades (**Figura 9.3**). Una vez emergidas las semillas en estos contenedores se distribuyen en el vivero protegida con malla sombra. Las plántulas se riegan diariamente y en épocas de altas temperaturas se recomienda regar hasta 3 veces en el día para evitar el estrés hídrico. El trasplante se puede realizar desde los 22 a los 50 días después de la emergencia, el cual depende de la especie del cultivo; por ejemplo, el trasplante de la sandía se realiza a los 22 días, el tomate verde de 25 a 28 días y el chile habanero se puede realizar desde los 35 a los 45 días después de la emergencia. El desarrollo y crecimiento de las plantas en el vivero depende del manejo de la nutrición y la prevención de plagas y enfermedades. Una planta vigorosa y sana obtenida en el vivero, se favorece ante las condiciones adversas de humedad en el suelo cultivado.



Figura 9.3 Producción de plántulas de chile habanero en charolas 50 y 200 cavidades en vivero.

Cubierta plástica. La cubierta plástica en la superficie del suelo es una práctica utilizada con frecuencia en la producción de hortalizas para reducir las pérdidas por evaporación en la superficie del suelo, acelerar el desarrollo del cultivo al incrementar la temperatura del suelo, reducir la erosión, o ayudar en el control de malezas. Una vez construida la cama de siembra y colocada la cinta o manguera del riego, se instala la cubierta plástica, la más usual es de color plateado - negro, cuyas características son: ancho de 1.2 m, para una cama de 0.6 m, calibre de 80 a 90 milésimas de pulgadas (**Figura 9.4**). El efecto de la cubierta plástica en la productividad del cultivo del tomate de cáscara (**Figura 9.5**) es muy significativo como se podrá notar en la sección 9.4, al

aumentar la transpiración de los cultivos y al reducirse los coeficientes de cultivos y la evaporación de la superficie del suelo.



Figura 9.4 Cultivo de chile habanero con cubierta plástica de color plateado-negro en Huimanguillo, Tabasco, México.



Figura 9.5 Cultivo de tomate de cáscara con cubierta plástica y espalderas en Huimanguillo, Tabasco México.

Fertirrigación. Un buen programa de fertilización, no consiste solamente en aplicar los nutrientes faltantes, sino en mantener el balance adecuado de los nutrimentos en la planta y el suelo. Para generar un buen programa de fertilización en el cultivo, es preciso conocer: el tipo de suelo, su contenido de nutrientes disponibles N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Fe, Cu, Mn, que cantidad de nutriente se va a extraer por cada tonelada de fruto fresco, cuánto se tiene que aplicar en función del rendimiento esperado, cómo se va a aplicar, qué fuentes de fertilizantes se va a aplicar, la eficiencia de la fertilización y la frecuencia de aplicación. La aplicación de las dosis de fertilización

por sección de riego se debe distribuir de la manera más uniforme posible los fertilizantes solubles cada tercer día o cada semana, según el programa y el calendario de riego.

9.3. EL RIEGO POR GOTEO

El método de riego por goteo es el más sencillo y usual en los sistemas de producción hortícola, consiste en la aplicación del agua al suelo en la zona radical de las plantas, basada en el uso de emisores o goteros de baja presión y caudal medio de un litro por hora por punto de emisión, conectados a un lateral (tubería que lleva el emisor o gotero) de polietileno (**Figura 9.6**). La aplicación de este método se hace en pequeñas dosis y de manera frecuente consiguiendo con esto un mejor control de la aplicación del agua y algunos otros beneficios agronómicos.



Figura 9.6 Sistema de riego por goteo para el cultivo de sandía en el municipio de Balancán, Tabasco.

El método de goteo alcanza eficiencias de uniformidad de 90 %. El requerimiento de mano de obra es bajo y también se utiliza para regar cultivos como frutales y flores. Además, permite la aplicación eficiente de fertilizantes y otros pesticidas a través del agua de riego

En la **Figura 9.7** se observa la instalación de la cinta de riego en la tubería de distribución y la cubierta plástica para realizar el trasplante del cultivo de chile habanero a una distancia de 1.5 m entre camas y 0.45 m entre plantas. Las características nominales de la lateral para hortalizas son: diámetro interno de 16 mm, calibres de 4 a 6 milésimas de pulgadas, flujo de 0.8 a 1.02 L h⁻¹, espacio entre emisores de 0.2 m, y presión de operación de 0.55 kg cm⁻² (8 PSI).



Figura 9.7 Instalación de sistema de riego por goteo con cintas y cubierta plástica.

9.3.1 Evapotranspiración del cultivo

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo se puede realizar por el método de tanque evaporímetro tipo "A". Se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de la ecuación (9.1).

$$ET_0 = Ev K_t \quad (9.1)$$

donde Ev es la evaporación diaria obtenida en tanque de la estación meteorológica, K_t es el coeficiente de tanque asumido igual a 0.8 (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 2006).

9.3.2 Coeficientes de cultivos (K_c)

En el **Tabla 9.1** se presentan valores de K_c para los cultivos de chile habanero y tomate de cáscara de acuerdo con la etapa fenológica y sistema de producción. Los valores de K_c , cuando no se disponen, se pueden obtener de Allen *et al.*, (2006) para chiles verdes y tomate verde sin plástico en las etapas inicial, intermedia y final de desarrollo del cultivo. Los K_c 's evaluados para tomate verde con cubierta plástica fueron tomados de López *et al.* (2010).

Tabla 9.1 Coeficientes de cultivos utilizados para la aplicación de láminas de riego en chile habanero y tomate de cáscara.

Cultivo/sistema	Inicial	Intermedia	Final
Chile habanero con plástico	0.4	0.8	0.7
Chile habanero sin plástico (Allen <i>et al.</i> , 2006)	0.6	1.05	0.9
Tomate verde con plástico (López <i>et al.</i> , 2010)	0.25	0.71	0.56
Tomate verde sin plástico (Allen <i>et al.</i> , 2006)	0.6	1.15	0.8

Con los K_c 's se estima la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) de acuerdo con la ecuación (9.2)

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (9.2)$$

De acuerdo con el **Tabla 9.2**, la programación de riegos en tiempos medios y las necesidades de riego se presentan en los meses de diciembre a agosto, los cuales varían desde 0.2 a 5.1 mm por día. En tiempo real, se aplican láminas de riego en los meses de septiembre a noviembre como se podrá notar en la sección 9.4 (rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en los cultivos de chile habanero y tomate de cáscara).

Tabla 9.2 Requerimientos de riego (RR) a nivel mensual y diario para el cultivos hortícolas a partir de datos basados en coeficientes de cultivos (K_c) propuesto por la FAO sin cubierta plástica y datos climáticos de una estación climatológica de Cárdenas, Tabasco.

Mes	Prec. Tot mm/mes	Prec. Efect mm/mes	ET_0 mm/mes	K_c	ET_r mm/mes	RR mm/mes	RR mm/día
Ene	121.1	71.9	118.5	1.15	136.3	64.4	2.1
Feb	105.9	59.7	130.0	0.90	117.0	57.3	2.1
Mar	43.8	16.3	163.2	1.00	163.3	147.0	4.7
Abr	39.6	13.8	168.2	1.00	168.2	154.5	5.1
May	65.4	29.2	184.6	0.60	110.7	81.5	2.6
Jun	182	120.6	157.8	0.80	126.2	5.6	0.2
Jul	158.9	102.1	162.5	1.00	162.5	60.4	2.0
Ago	197.4	132.9	162.5	1.15	186.8	53.9	1.7
Sep	303.9	218.1	138.3	0.90	124.5	0.0	0.0
Oct	315.1	227.1	114.7	0.60	68.8	0.0	0.0
Nov	173.8	114.0	120.0	0.80	96.0	0.0	0.0
Dic	132.5	81	122.1	1.00	122.1	41.1	1.3

Nota: Prec. Tot= precipitación total, Prec. Ef.= precipitación efectiva (aproximadamente igual al 80 % de la precipitación total. Depende de la intensidad de la precipitación).

9.3.3 Monitoreo de la tensión de humedad del suelo

Para el monitoreo de la humedad del suelo se pueden instalar tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad en el terreno (**Figura 9.8**). Los valores de tensión de humedad del suelo son indicadores de que las láminas de riego aplicadas al cultivo son suficientes para satisfacer sus requerimientos hídricos, es decir el esfuerzo que la planta realiza para absorber el agua a través de sus raíces no deben ser menores que los niveles críticos de tensión de humedad, o menores que la capacidad de campo. (< -33 kPa).

La tensión de humedad del suelo en la primera capa del suelo (15 cm) puede variar de 0 a -25 kPa durante todo el ciclo de los cultivos, mientras que en la capa de 30 cm del suelo, la tensión de humedad puede variar entre -10 a -25 kPa.



Figura.9.8 Tensiómetros instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el cultivo de chile habanero.

9.4 RENDIMIENTO DE FRUTOS Y USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO (UEAR) EN CHILE HABANERO Y TOMATE DE CÁSCARA

9.4.1 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de chile habanero.

El Uso eficiente del agua de riego se define como el rendimiento de fruto verde (Rf) en Kg ha^{-1} obtenido por el volumen total de riego (Vt) en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ aplicada desde el trasplante hasta la cosecha, no se incluye la lámina de agua de lluvia.

$$UEAR = \frac{Rf}{Vt} \quad (9.3)$$

En el ciclo O-I/2012-2013, a partir de los rendimientos de fruto obtenidos y la lámina de riego aplicada, la eficiencia en el uso del agua para el cultivo de chile habanero fue de 8.7 y 6.5 kg m^{-3} con y sin cubierta plástica, respectivamente. Nagaz *et al.*, (2012) encontraron valores más bajos de productividad del agua en el cultivo de chile (*Capisicum annum* L.), entre 2.3 y 5.5 kg m^{-3} , los cuales variaron en función de láminas de riego aplicadas con diferentes déficit de riego (394 a 750 mm).

En el ciclo O-I/2013-2014 se obtuvieron 19 cortes de frutos con una periodicidad semanal. Para la fecha de trasplante del 13 de septiembre, con la variedad Jaguar se obtuvo un rendimiento promedio de frutos de 34.1 t ha^{-1} y UEA de 5.7 kg m^{-3} y con la variedad *orange* de 37.3 t ha^{-1} y UEA de 6.9 kg m^{-3} . En la fecha de trasplante del 30 de septiembre con la variedad *orange*, se obtuvo un rendimiento promedio de frutos de 24 t ha^{-1} y el UEA de 4.4 kg m^{-3} , los cuales disminuyeron significativamente ($P < 0.01$) con respecto de la primera fecha de trasplante. Nagaz *et al.*, (2012) encontraron valores

más bajos de productividad del agua en el cultivo de chile (*Capisicum annum* L.), entre 2.31 y 5.49 kg m⁻³, los cuales variaron en función de láminas de riego aplicadas con diferentes déficit de riego equivalentes (394 a 750 mm).

La cantidad de agua lluvia durante el ciclo experimental del cultivo para la fecha de trasplante del 13 de septiembre de 2013 al 5 de mayo de 2014 fue de 1471.2 mm, la lámina de riego aplicada fue de 593.5 mm. Para la fecha de trasplante del 30 de septiembre al 5 de mayo (ciclo del cultivo), la lámina de riego aplicada fue de 543.4 mm y una precipitación ocurrida durante el ciclo de 1400.5 mm (**Tabla 9.3**). Las láminas de riego corresponden a la evapotranspiración del cultivo estimada previamente de acuerdo con la evaporación de tanque y los coeficientes de cultivo evaluados para las distintas etapas fenológicas del chile habanero.

Tabla 9.3 Efecto de la fecha de trasplante, variedad y ciclo en el rendimiento de frutos y la productividad de agua de riego para chile habanero con riego por goteo y cubierta plástica en suelos Fluvisoles de Huimanguillo, Tabasco.

Fecha de trasplante/Varietal/Ciclo	Precipitación total ocurrida (mm)	Lámina de riego (mm)	Rendimiento de frutos (t ha ⁻¹)	UEAR (kg m ⁻³)
30 Ene-Jaguar CP O-I/2012-13	262.5	363.5	27.4 a	8.7 a
30 Ene-Jaguar SP O-I/2012-13	262.5	415.0	20.5 a	6.5 a
15 Feb Jaguar CP O-I/2012-13	439.5	315.0	11.5 b	3.6 b
13 Sept/Orange CP O-I/2013-14	1471.2	593.5	37.3 a	6.9 a
13 Sept/Jaguar CP O-I/2013-14	1471.2	593.5	34.1 a	5.7 a
30 Sept/Orange CP O-I/2013-14	1400.5	543.4	24.0 b	4.4 b
15 Nov/Orange CP O-I/2013-14	710.7	245.6	15.6 c	6.3 a

CP: con plástico SP: sin plástico, UEAR: Uso eficiente del agua de riego.

²Valores con la misma letra dentro de columna son iguales, según la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$.

El uso eficiente del agua de riego cuando se utiliza la cubierta plástica es mayor que cuando no se utiliza. Está claro que la cubierta plástica aumenta significativamente el UEA, sin embargo, la gran mayoría de investigadores reportan la productividad del agua en función de la lámina aplicada y no con base en la evapotranspiración del cultivo (ETc). Klar y Jadoski (2004) reportaron que el UEAR en chile verde fue de 69 L kg⁻¹ en los tratamientos con cubierta plástica, en comparación con los tratamientos sin cubierta que fue de 140 L kg⁻¹ de fruto en una región de clima húmedo en condiciones protegidas.

El análisis de varianza en el rendimiento de frutos demostró que existen diferencias significativas en el cultivo de chile habanero con y sin cubierta plástica ($P < 0.052$). Sin embargo, la comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$) indica que son estadísticamente iguales (**Tabla 9.2**). El efecto de la cubierta plástica en el cultivo de chile habanero, se obtuvo en promedio 27.4 t·ha⁻¹ y sin plástico 20.5 t·ha⁻¹, lo que representa un incremento del 25.2 % en el rendimiento de frutos. Este valor supera el rendimiento promedio experimental obtenido por López y Mirafuentes (2004) que fue de 22 t ha⁻¹ y similar al potencial productivo de variedades mejoradas que es de

30 t ha⁻¹ para los ciclos primavera verano y otoño invierno de acuerdo con Aceves *et al.*, (2009).

En la **Figura 9.9** se presenta el rendimiento de frutos de chile habanero por corte, observándose que el corte número 2 alcanzan los valores máximos de 9.3 t ha⁻¹ con plástico y de 4.7 t ha⁻¹ sin plástico, con un total de 27.4 t ha⁻¹ y 20.5 t ha⁻¹, respectivamente, en los 8 cortes realizados durante el ciclo del cultivo.

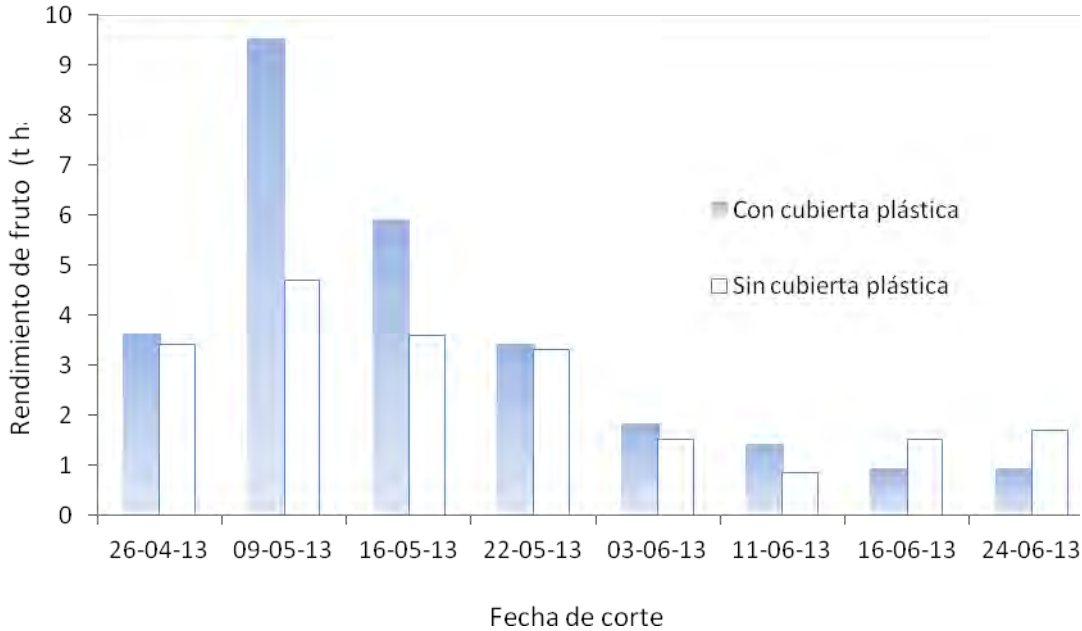


Figura 9.9 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento de frutos en kg ha⁻¹ por corte del cultivo de chile habanero con riego por goteo en el ciclo O-I/2012-2013.

Estas diferencias en rendimiento de frutos se debieron a que en la cubierta plástica, existe un incremento de la temperatura y un aumento general de la transpiración del cultivo, debido a la transferencia de calor sensible y radiactivo desde la superficie de la cubierta de plástico hacia las adyacencias de la vegetación

Tensión de humedad del suelo. Respecto del potencial matricio del suelo en la primera capa de 15 cm, la tensión de humedad fue de -2 a -42 kPa durante el ciclo del cultivo, mientras que en la capa de 30 cm del suelo, la tensión de humedad varió entre -4 a -52 kPa (**Figura 9.10**). Los valores de tensión de humedad del suelo y las láminas de riego aplicadas al cultivo complementadas con la precipitación indican el esfuerzo que la planta realiza para absorber el agua a través de sus raíces, estos alcanzaron en algunos días sus niveles críticos, menores que capacidad de campo. (< -33 kPa), pero la duración de este fue menor que dos días, esto evitó que el cultivo no presentara síntomas de estrés hídrico.

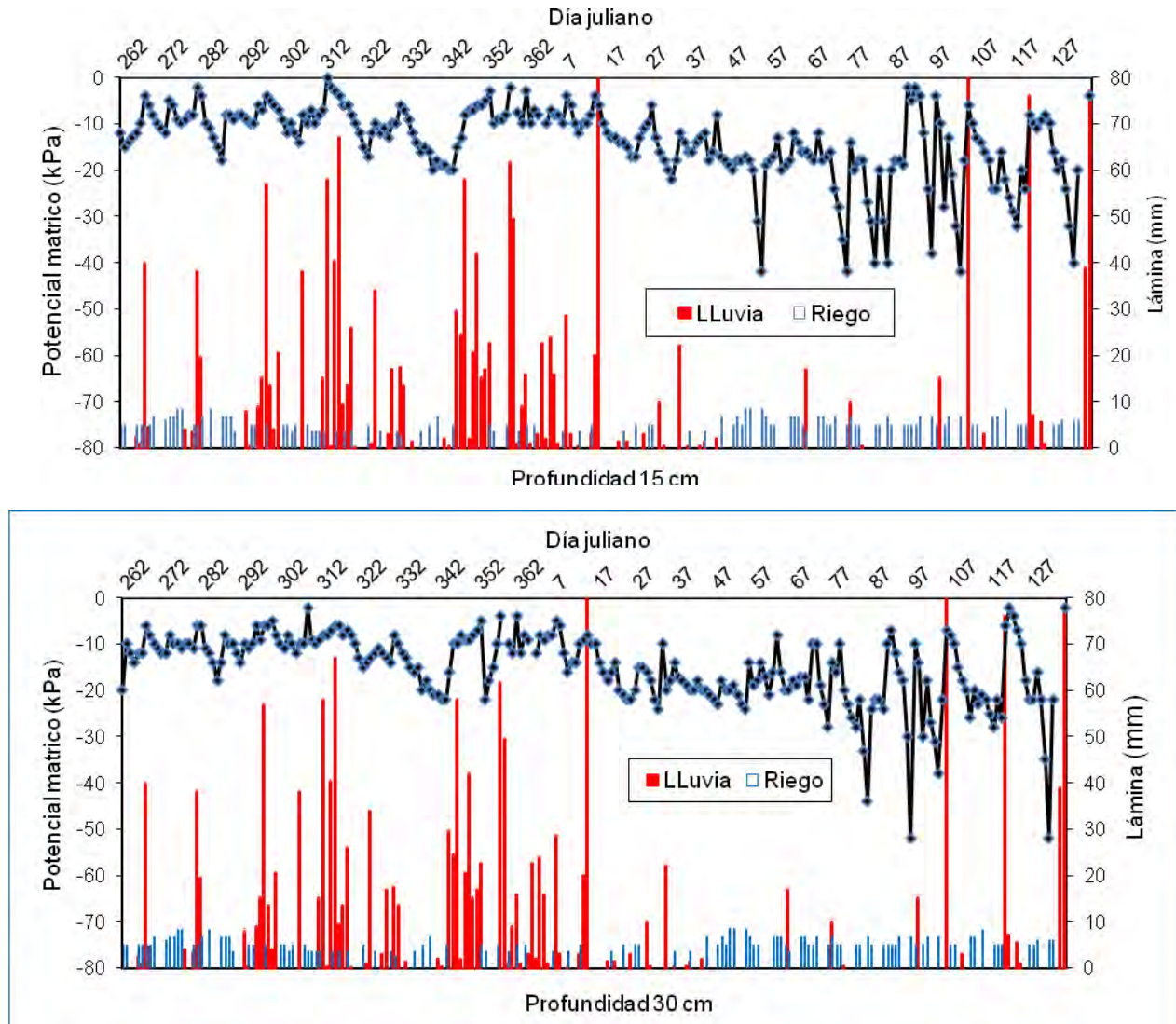


Figura 9.10 Efecto de la lámina de riego y la precipitación en el potencial matrico del suelo a la profundidad de 15 y 30 cm en el cultivo de chile habanero con cubierta plástica.

Las aplicaciones de las láminas de riego variaron entre 2.5 a 8.5 mm por día de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo tomando en cuenta la cubierta plástica fueron: 0.5, 0.9 y 0.7 en las etapas inicial, intermedia y final del cultivo, respectivamente, permite aumentar la eficiencia de aplicación del agua de riego y como consecuencia existe un ahorro de agua aproximadamente del 18 % comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.*, (2006) en el boletín 56 de la FAO para el cultivo de chile verde (0.6, 1.15 y 0.8).

9.4.2 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de tomate de cáscara.

En tomate de cáscara existen diferencias altamente significativas ($P=0.004$) debidas al efecto de la cubierta plástica (**Tabla 9.4**), e incluso se puede observar el efecto del aumento de la precocidad en el primer corte (**Figura 9.11**), donde la población sin plástico no presentó rendimiento de frutos. El rendimiento de frutos de tomate de cáscara con cubierta plástica, fue en promedio de $32.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ contra $14.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obtenido con la población sin cubierta plástica, lo que representa un incremento del 56.2 %.

Tabla 9.4 Láminas de riego, precipitación y eficiencia del agua de riego en el cultivo de chile habanero y tomate verde con riego por goteo con y sin cubierta plástica.

Cultivo/Sistema	Precipitación (mm)	Lámina de riego (mm)	Uso eficiente del agua de riego (kg m^{-3})
Tomate verde con cubierta plástica	288.0	255.0	21.4 a
Tomate verde sin cubierta plástica	288.0	366.0	11.5 b

^aValores con la misma letra dentro de columna son iguales según la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$.

Las aplicaciones de las láminas de riego variaron entre 2.5 a 7 mm por día de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo tomando en cuenta la cubierta plástica permiten aumentar la eficiencia de aplicación del agua de riego y como consecuencia existe un ahorro de agua del 19 % comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.*, (2006) para el cultivo de jitomate sin cubierta plástica.

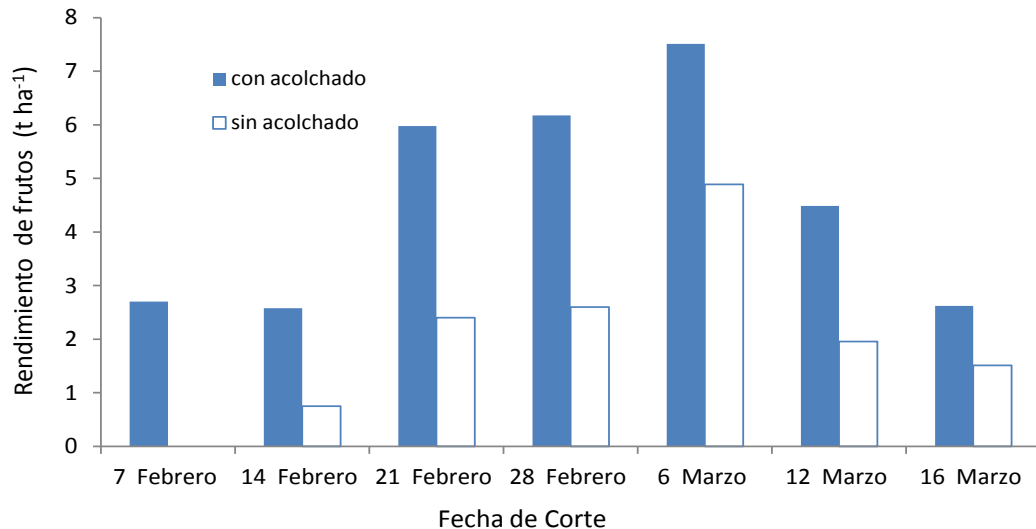


Figura 9.11 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento por corte de frutos de tomate verde con riego por goteo en el ciclo OO-I/2011-2012.

Al respecto, mencionaron que la tasa de transpiración de cultivos en el plástico se incrementa en un promedio de 10 a 30 % a lo largo del ciclo del cultivo, comparado con la ausencia de la cubierta plástica, el valor de K_c disminuye en un promedio de 10 a 30 % debido a la reducción de la evaporación en el suelo, estimada en un 50 a 80 %.

En la **Figura 9.12 y 9.13** se presentan el rendimiento de frutos de tomate de cáscara por fecha de corte obtenidos en el ciclo O-I/2012-2013, en el sitio Ejido Huimanguillo (EH) y en el Campo Experimental Huimanguillo (C.E.H), observándose que el número total de cortes fueron de 8 y 11 con rendimientos variándose entre 0.5 a 10 t ha⁻¹ durante el ciclo del cultivo, respectivamente. Los rendimientos totales fueron de 46.1 en el EH y 54.6 t ha⁻¹ en el C.E.H.

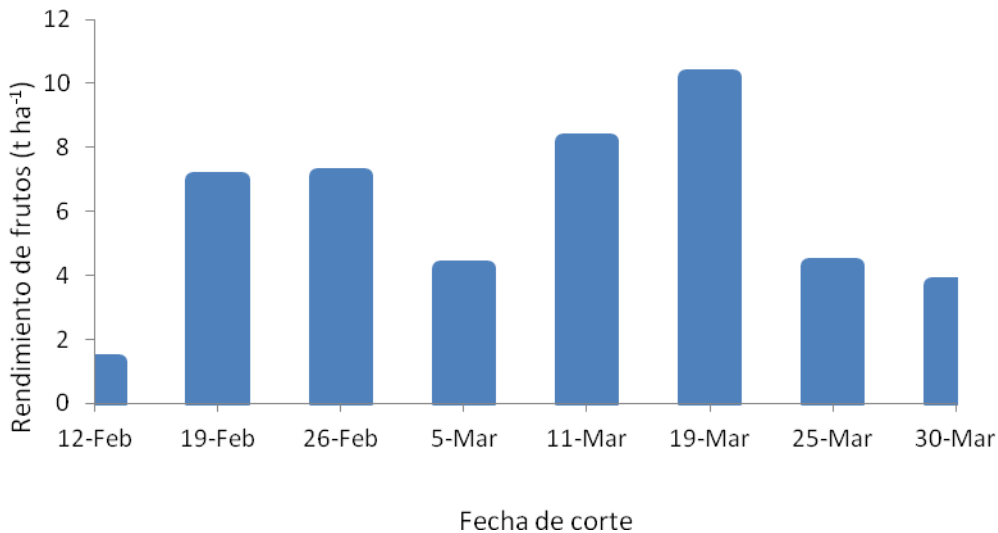


Figura 9.12 Rendimiento de frutos en t ha⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un Fluvisol de Huimanguillo, Tabasco.

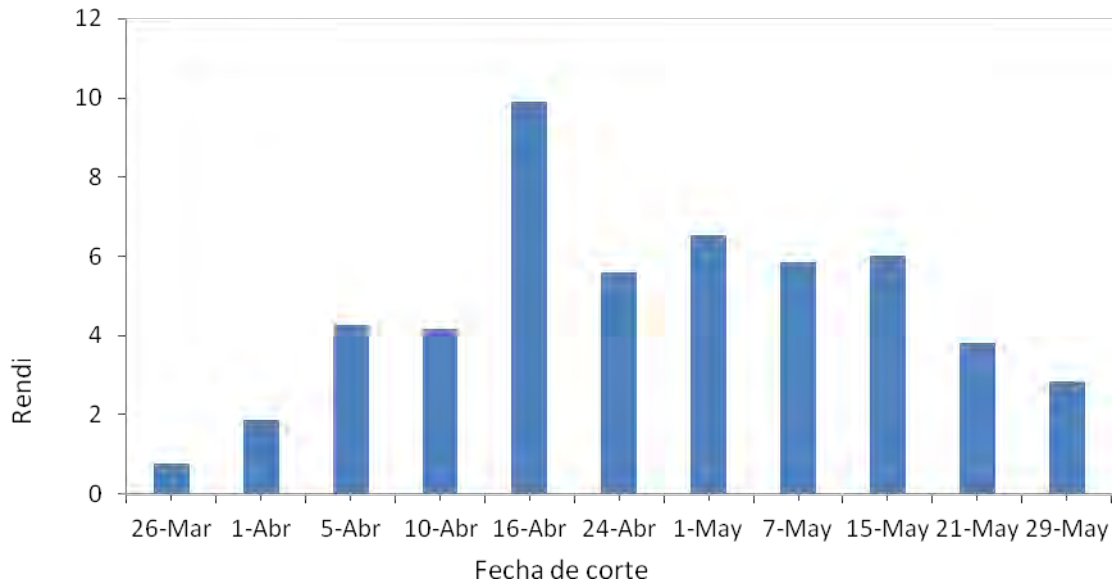


Figura 9.13 Rendimiento de frutos en t ha⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un suelo Fluvisol del Campo Experimental Huimanguillo.

En contraste con la producción media nacional de 14 t ha⁻¹ y uso eficiente de agua de 2.54 kgm⁻³, aunada a la mala calidad de frutos en sistemas tradicionales (riego por gravedad) o temporal, la tecnología de producción con cubierta plástica en condiciones de riego por goteo, incrementó el rendimiento de frutos en 69.6 y 74.3 % en los sitios de estudio Ejido Huimanguillo (suelo arenoso) y C.E. Huimanguillo (suelo franco arcilloso), respectivamente. La eficiencia en el uso del agua de riego se incrementó en 63.5 %, con UEAR de 16.1 y 19.1 kg m⁻³, respectivamente.

Tensión de humedad del suelo. En la **Figura 9.14** se observa el efecto de la lluvia y el riego en el potencial mátrico medido con los tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad. La cantidad total del agua de lluvia ocurrida durante el ciclo del cultivo (O-I/2012-2013) fue de 288.5 mm. La lámina de riego acumulada y aplicada al cultivo fue de 366 mm basada en la evapotranspiración del cultivo. En la primera capa del suelo (15 cm) la tensión de humedad varió de 0 a -20 kPa durante el ciclo del cultivo, mientras que en la capa de 30 cm, la tensión de humedad osciló entre -10 a -30 kPa, es decir cercano a capacidad de campo (-33 kPa). Los valores indican el esfuerzo que la planta debe ejercer para absorber el agua a través de sus raíces.

Las aplicaciones de las láminas de riego variaron entre 3 a 6 mm por día, de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo basados en la cubierta plástica: 0.25, 0.71 y 0.56 en las etapas inicial, intermedia y final del cultivo, respectivamente (López *et al.*, 2010), aumentó la eficiencia de aplicación del agua de riego y como consecuencia existe un ahorro de agua aproximadamente del 25 % comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.*, (2006) para el cultivo de tomate (0.6, 1.15 y 0.8).

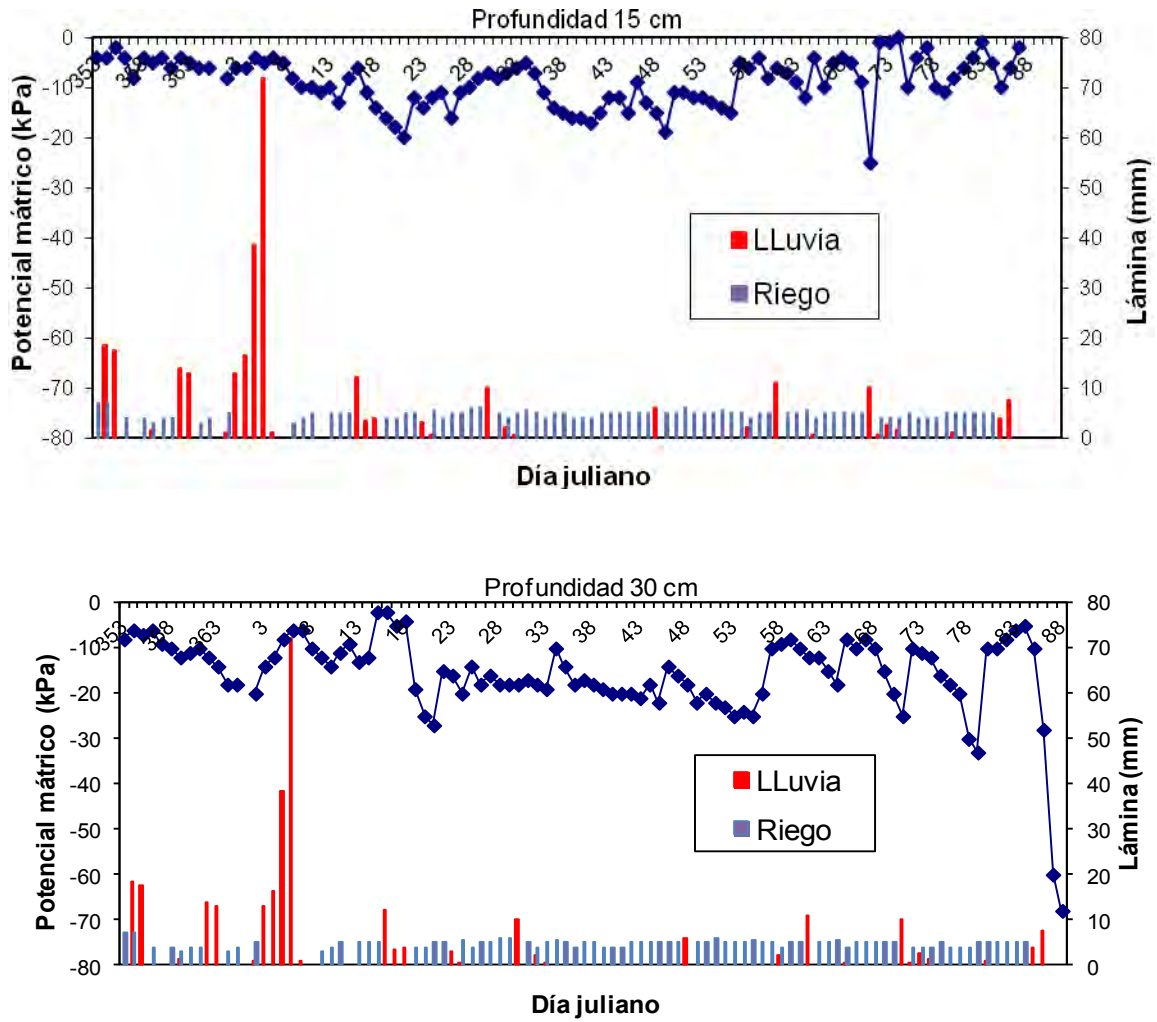


Figura 9.14 Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a dos profundidades (15 y 30 cm) en el cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo y cubierta plástica en el ciclo 2012- 13.

9.5 CONCLUSIONES

La programación del riego en los cultivos hortícolas (chile habanero y tomate de cáscara) basada en la evapotranspiración real y el potencial de presión del agua en el suelo incrementa la productividad de los cultivos hasta en un 50 % y el uso eficiente del agua de riego hasta en 64 %. Existe un ahorro del 18 % del costo de operación del riego comparado con los sistemas tradicionales.

La fecha de trasplante y la cubierta plástica son los dos factores más importantes que determinan los requerimientos hídricos de los cultivos y tienen un efecto muy significativo en el rendimiento de frutos y en el uso eficiente del agua de riego.

La tensión de humedad del suelo es un buen indicador del momento de riego y complementa información confiable en la programación del riego. Los cultivos de chile habanero y tomate de cáscara requiere de una humedad cercana capacidad de campo (-33 kPa).

Figura 9.1 Variación de los elementos del clima (temperaturas máxima y mínima y precipitación) y láminas de riego durante el ciclo del cultivo de chile habanero, O-I/2012-2013. Huimanguillo, Tabasco, México.....	273
Figura 9.2 Fuente de abastecimiento de agua superficial para riego y sistema de filtrado de grava y arena.....	274
Figura 9.3 Producción de plántulas de chile habanero en charolas 50 y 200 cavidades en vivero.....	275
Figura 9.4 Cultivo de chile habanero con cubierta plástica de color plateado-negro en Huimanguillo, Tabasco, México.....	276
Figura 9.5 Cultivo de tomate de cáscara con cubierta plástica y espalderas en Huimanguillo, Tabasco México.....	276
Figura 9.6 Sistema de riego por goteo para el cultivo de sandía en el municipio de Balancán, Tabasco.....	277
Figura 9.7 Instalación de sistema de riego por goteo con cintas y cubierta plástica...	278
Figura.9.8 Tensiometros instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el cultivo de chile habanero.	280
Figura 9.9 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento de frutos en kg ha ⁻¹ por corte del cultivo de chile habanero con riego por goteo en el ciclo O-I/2012-2013.	282
Figura 9.10 Efecto de la lámina de riego y la precipitación en el potencial matrico del suelo a la profundidad de 15 y 30 cm en el cultivo de chile habanero con cubierta plástica.	283
Figura 9.11 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento por corte de frutos de tomate verde con riego por goteo en el ciclo OO-I/2011-2012.	284

Figura 9.12 Rendimiento de frutos en $t\ ha^{-1}$ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un Fluvisol de Huimanguillo, Tabasco.....	285
Figura 9.13 Rendimiento de frutos en $t\ ha^{-1}$ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un suelo Fluvisol del Campo Experimental Huimanguillo.	286
Figura 9.14 Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a dos profundidades (15 y 30 cm) en el cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo y cubierta plástica en el ciclo 2012- 13.....	287
Tabla 9.1 Coeficientes de cultivos utilizados para la aplicación de láminas de riego en chile habanero y tomate de cáscara.....	278
Tabla 9.2 Requerimientos de riego (RR) a nivel mensual y diario para el cultivos hortícolas a partir de datos basados en coeficientes de cultivos (Kc) propuesto por la FAO sin cubierta plástica y datos climáticos de una estación climatológica de Cárdenas, Tabasco.....	279
Tabla 9.3 Efecto de la fecha de trasplante, variedad y ciclo en el rendimiento de frutos y la productividad de agua de riego para chile habanero con riego por goteo y cubierta plástica en suelos Fluvisoles de Huimanguillo, Tabasco.....	281
Tabla 9.4 Láminas de riego, precipitación y eficiencia del agua de riego en el cultivo de chile habanero y tomate verde con riego por goteo con y sin cubierta plástica.....	284

*“La tierra tiene suficiente para las necesidades de todos,
pero no para la avaricia de unos cuantos”
Gandhi*

**Literatura
citada**

10

CAPITULO 10

LITERATURA CITADA

- Abad M., Martínez P. F., Martínez M. D., y Martínez J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de horticultura*, 11:141-154.
- Abad, M.; Noguera, P. 1998. Sustratos Para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: *Fertirrigación. Cultivos Hortícolas Y Ornamentales*. Coord. C. Cadahia. pp. 287-342. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Aceves N. L.A., Juárez L. J.F., Palma, L. J.D., López L. R., Rivera H. B., Rincón Ramírez J. A., Morales C. R. Hernández A. R. 2009. Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en el estado de Tabasco. SEDAFOP, Gobierno del Estado de Tabasco. 12 p.
- Allen R. G., C. E. Brockway y J. L. Wright. 1983. Weather station siting and consumptive use estimates. *Journal of Water Resources. Planning and Management Division. Amer. Soc. Civil Eng.* 109:134-146.
- Allen R. G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration. Irrigation and Drainage paper 56*. FAO. Roma, Italia. 300 pp.
- Allen R.G. y W. O. Pruitt. 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *J. of American Society of Civil Engineers*. 112:139-156.
- Allen, G., R.; Pereira, S. L.; Raes, D.; Smith, M. 2006. *Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- Allen, R. G. M. E. Jensen, J. L. Wrishty, R. D. Burman. 1989. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81 (4): 652 – 662.
- Amoozegar-Fard, A., A.W. Warrick, y D. O. Lomen. 1984. Design monographs for trickle irrigation systems. *J. Irrig. Drain. American Society of Civil Engineers*. 110:107-120.
- Antony E., Singandhupe R.B., 2004. Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (*Capsicum annuum* L.). *Agric. Water Manage.*, 65 (2): 121-132.
- Ayers R.S., and D.W. Westcot. 1984. *Calidad del agua para la agricultura. Riego y Drenaje n° 29*, FAO. Roma. 85 pp.
- Baker, J.M. and C.H.M. van Babel, 1987. Measurement of mass flow of water in stems of herbaceous plants. *Plant cell and environment* 10:777-782.

- Bakker J.C., Bot G.P.A, H, Challa, N.J. Von de Braak. Editors. 1995. Greenhouse climate control , an integrated approach. Wageningen Pers. Wageningen, 1995.
- Benoit, E., Ceustermans, N. 1990. The use of recycled polyurethane (PUR) as an ecological growing medium. *Plasticulture* 88, 41-48.
- Borg, H. Y D. W. Grimes. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description, *Transactions of the ASAE*. 29: 194-197.
- Bosland, P.W. and Votava, E.J., 1999. Peppers: vegetable and spice capsicums. CABI Publishing, New York.
- Bowen, I. S. 1962. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water. *Phys. Rev.* 27:779-787.
- Burés, Silvia. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 339 pp.
- Burt, C. M., A. J. Clemmens, T. S. Strelkoff, K. H. Solomon, R. D. Bliesner, L. A. Hardy, T. A. Howell. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. And drain. Engrg. ASCE*. 123(6):423-442.
- Cahoon, J., J. Ferguson, D. Edwards, y P. Tacker. 1990. A microcomputer based irrigation scheduler for the humid mid-south region. Vol. 6:289-295.
- Campbell, G. S. 1977. An introduction to environmental biophysics. Springer Verlag. New York. USA. 159 pp.
- Castilla P. N. y Montalvo, L. T. 1998. Programación del riego. En *Fertigación*. Editado por Cadahia C. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 475 pp.
- Castilla, N. 1994. Greenhouse in the mediterranean area: Technological level and strategic management. *Acta Hort.* 361: 44-56.
- Castilla, N., Fereres, E. 1990. The climate and water requirements of tomato in unheated plastic greenhouses. *Agricultura Mediterránea*. 120:268-274.
- Castilla, N; López Gálvez, J. 1993. Programación del riego localizado en invernadero. Edt HF.
- Choisnel, E. O. de Villele y F. Lacrose. 1992. Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne. *Com. Commum. Européenes*. EUR 14223. FR. Luxembourg. 176 pp.
- Choudhury, B.J. y Monteih, J.L. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogenous land surfaces. *Q. J. of the Royal Meteorological Society* 114: 373-398.
- Clemmens A. J., T. S. Strelkoff, y C. M. Burt. 1995. Defining Efficiency and Uniformity: Problems and Perspective. P.1521-1525. En *Proceedings of the First International Conference on Water Resources*. San Antonio, Tx. E.E.U.U. American Soc. Of Civil Engineers.

- CNA-Comisión Nacional del Agua, 1994. Transferencia de los Distritos de Riego en México. Mexico, D.F. 87 pp.
- Comisión Nacional del agua. 2008. Fecha de consulta 09/07/08. <http://www.conagua.gob.mx>.
- Cook, Roberta L. and Linda Calvin. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American fresh tomato industry. Economic research report (United States. Dept. of Agriculture. Economic Research Service); no. 2. USDA. USA. Electronic Report from the Economic Research Service. www.ers.usda.gov
- Cuenca, R.H. 1989. Irrigation System Design: An engineering Approach. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, EEUU.
- D. H. Willits, 2003. The Penman-Monteith Equation As a Predictor of transpiration in a Greenhouse Tomato Crop. Bio and Ag Eng Dept, North Carolina State University, Raleigh, NC. ASAE Annual International Meeting. Las Vegas, Nevada, USA. Paper No. 034095.
- Daamen, C.C. 1997. Application of a two source energy balance model to a sparse millet field and the use of soil surface resistance. *Agricultural and Forest Meteorology* 83: 205-230.
- Dalton, F. N. y W. N. Herkelrath, D.S. Rawlins y J. D. Rhoades. 1984. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224:989-990.
- De Boodt M., Verdonck O. y Cappaert I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37:2054-2062.
- De Juan Valero, J.A. y Martín de Santa Olalla, F. 1992b. "El cálculo y la estimación de la evapotranspiración". *Agronomía de riego* editado por Martín de Santa Olalla, F. Y De Juan Valero, J.A. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología, Universidad de Castilla- La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 732 p.
- Della Costa L., Gianquinto G., 2002. Water stress and watertable depth influence yield, water use efficiency, and nitrogen recovery in Bell Pepper: Lysimeter Studies. *Aust. J. Agric. Res.*, 53: 201-210.
- Doorenbos, J y W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage paper No. 24, (rev). FAO. Roma, Italia. 144 pp.
- Doorenbos, J. and A.H. KASSAM. 1986. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 193 p.
- Doorenbos, J., y Pruitt, W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección de Riego y Drenaje, Paper 24, FAO, Roma. 190 p.

- Dorji K., Behboudian M.H., Zegbe-Dominguez J.A., 2005. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial root zone drying. *Sci. Hortic.*, 104: 137-149.
- Ehrler, W. L., S. B. Idso, R. D. Jackson, y R. J. Reginato. 1978. diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agron. J.* 70:999-1004
- FAO, 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Serie FAO N° 33. Estudios del agua sobre riego y drenaje. Roma. 212 p.
- FAO. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Serie FAO N° 24. Estudios del agua sobre riego y drenaje. Roma. 194 p.
- FAO. 1980. Drainage design factors. Irrigation and Drainage Paper No. 38. Rome.
- FAO. 1990. Programación del riego. Manual de campo No. 24. Roma. Italia.
- Fernández Ma. D., F. Orgaz, E. Fereres, J. C. López, A. Céspedes, J. Pérez, S. Bonachela, M. Gallardo. 2001. Programación del riego de cultivos hortícola bajo invernadero en el sudeste español. CAJAMAR. Almería, España. 62 p.
- Fereres, E., R. E. Goldfien, W. O. Pruitt, D.W. Henderson, R.M. Hagan. 1981. The irrigation management program: A new approach to computer assisted irrigation scheduling. En *Proceeding of Irrigation for Water and energy conservation in the 80's*. ASAE. St. Joseph, Mich. USA. 202-207.
- Fernández G.y Cols. 2000. Manual de riego para agricultores. Modulo I, Fundamentos de riego. Consejería de agricultura y pesca, junta de Andalucía. España.
- Fernández, F. M. D. 2001. Métodos de programación del riego. En. Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Estación Experimental "Las Palmerillas de Cajamar". Ed. Cajamar. Almería, España.
- Fernández, F. M. D. 2001b. Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo anarenado de Almería. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería. . Almería, España.
- Fervert, D. K., R.W. Hill y B. C. Braaten. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients, *Journal of the Irrigation and drainage Division, ASCE, American Society of Civil Engineering.* 109:265-269
- Gardner, W. R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science.* 85:228-232.
- Gislerod, H. R. y Kempton, R. J. 1983. The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomate cultura. *Science Hort.* 20:23-33.
- Haman, D.Z., A.G. Smajstrla and F.S. Zazueta, 1990. Chemical Injection Methods for Irrigation. Florida. Cooperative Extension Service Bulletin 864, May 1990.
- Handreck K. A. y Black N. D. 1991. Geowing media for ornamental plants and turf. New South Wales University Press, Kensington. 401 pp.

- Hanks, R. J y R. W. Hill. 1980. Modelling crop responses to irrigation in relation to soils climate and salinity. Irrigation Information Centre. IIC. Publication No. 6.
- Hanson, B., Schwankl, L., y Fulton, A. 1999. Scheduling irrigation: when and how much water to apply. Resources publication 3396. University of California Irrigation Program. University of California. Davis, California. USA.
- Hargreaves, H.G. y Samani Z. A. 1992. Irrigation Scheduling. New Mexico State University. Las Cruces. EE.UU.
- Harrington, G. J. y D. F. Heerman. 1981. State of the art irrigation scheduling computer program. EN Proceeding of the ASAE Irrigation Scheduling conference for water and energy conservation in the 80's. Chicago, Il, USA. 14-15 dic.
- Hart, W. E. y W. N. Reynolds. 1965. Analytical design of sprinkler systems. Trans. ASAE. 8(1):83-85
- Hernández, R. J. 2001. Calibración del método de reflectometría (TDR) para estimar el contenido de humedad del suelo en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sin. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.
- Hill, R. W., E. L. Johns y D. K. Frevert. 1983. Comparison of equations used for estimating agricultural crop evapotranspiration with field research. U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation. USA.
- Hillel, D. 1991. Introduction to soil physics. Academic Press. San Diego, Cal, EE.U.U. 362 pp.
- Ho, L. C. y P. Adams. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. Acta Horticulturae. 396:33-44.
- <http://www.laspalmerillas.cajamar.es/Documentos/PrgRieg.pdf>.
- Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter, Jr., R. J. Reginato y J. L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol. 24:45-55.
- Jensen, M. E., D.C. N. Robb, y C. E. Frazoy. 1970. Scheduling Irrigation using climate-crop-soil data. Journal of Irrigation. Drain Division. American Society of Civil Engineers. 96:25-28.
- Jensen, M. E., R.D. Burman, y R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. 332 pp.
- Jensen, M. J. 1981. Summary and challenges. In proc. Of the ASAE's irrigation Scheduling Conference. Irrigation Scheduling for water & Energy Conservation in the 80's. ASAE publication 23-81. Ame. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, MI. pp 225-231.
- Jones H.G., 2004. Irrigation Scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. J. Exp. Bot., 55: 2427-2436.
- Keller, J y Karmeli, D. 1975. Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. California. 133 p.

- Kirnak H., Demirtas M.N., 2006. Effects of different irrigation regimes and mulches on yield and macronutrition levels of drip-irrigated cucumber under open field conditions. *J. Plant Nutr.*, 29: 1675-1690.
- Klar, A.E. & Jadoski, S.O., 2004. Irrigation and mulching management for sweet pepper crop in protected environment. *Irrigation* 9(3), 217-224.
- Lomas, J. y J. Levin. 1979. Irrigation. En *Agrometeorology*. Editado por J. Seemann, Y. I. Chirvkov, J. Lomas y B. Primault. Springer-Verlag. 49 pp.
- López J.C., P. Lorenzo, N. Castilla, J. Pérez-Parra, J.I. Montero, E. Baeza, A. Antón, M.D. Fernández, A. Baille, M. González-Real. 2001. Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. CAJAMAR. ALMERÍA, España.
- López J.C., P. Lorenzo, E. Medrano, M. C. Sánchez-Guerrero, J. Pérez, H. M. Puerto y M. Arco. 2000. Calefacción de invernaderos en el sudeste español: resultados experimentales para cultivos de pepino y judía. Caja Rural de Almería. Almería, España. 54 pp.
- López L. R., Sánchez C. I, Inzunza I. M.A., Fierro A. A. 2013. Desarrollo tecnológico para la producción de tomate verde (*Physalis Ixocarpa* Brot) en Tabasco, México. *In: Memoria de II Simposium Internacional en Producción Agroalimentaria y XXV Reunión Científica y Tecnológica Forestal y Agropecuaria de Tabasco'2013. 6 y 7 de Septiembre de 2013. Universidad Tecnológica de Villahermosa, Tabasco, México p: 85-96.*
- López, L. R. y Mirafuentes H. F. 2004. Sistema de fertirrigación y acolchado plástico en la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq). *In: Primera Convención Mundial del Chile 2004. León Guanajuato, México, 27 al 29 de junio de 2004. p: 223-229.*
- López-López R, Arteaga-Ramírez R, Vázquez-Peña MA, López-Cruz I. L, Sánchez-Cohen I 2010. Evapotranspiración del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Mediante el potencial mátrico del suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33 (2): 157-168.
- Lorenzo, P., Maroto, C., Castilla, N. 1990. CO2 in plastic greenhouse in Almeria (Spain). *Acta Hort*: 268: 165-169.
- Lynch, D. R., N. Foroud, G. C. Kozub y B. C. Farries. 1995. The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties. *Am. Potato J.* 72(6):375-385.
- Magán, J.J.; Romera, M.P.; Cánovas, F.; Fernández, E. 1999. Ahorro de agua y nutrientes mediante un sistema de cultivo sin suelo con reúso del drenaje en tomate larga vida. XVII Congreso Nacional de Riegos. Actas: 186-193. Murcia. AERYD.

- Marshall T.J. y J.W. Holmes. 1988. Soil Physics. Cambridge University Press. 374 pp. New York, EE.UU.
- Martin, D. L., E. C. Stegman, y E. Fereres. 1990. Irrigation scheduling principles. En "Management of farm irrigation systems". eds. Hoffman, G. J., T.A. Howell y K. H. Solomon. pp. 155-203. ASAE monograph. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, EE.UU.
- Mccarthy, M.G. 1998. Irrigation management to improve winegrape quality – nearly 10 years on. The Australian grapegrower and Winemaker, Annual Technical Issue: 65-71.
- Merriam, J. L. y Séller, J. (1978). Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Utah St. Univ. Logan
- Merva, E. G. 1995. Plant Biosystem. ASAE Textbook No. 9. Amer. Soc. Agr. Eng. St. Joseph, MI. 272 pp.
- Millar, A. 1993. Manejo de agua y producción agrícola. IICA y Universidad de Concepción. 556.
- Monteith, J.L. and Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London. 291 pp.
- Montero, M., Acosta, D., Fernández, G., Cadena, C., 2002. Deterioro del EVA de paneles fotovoltaicos. ASADES. VOL. 6 No. 1.
- Myburgh, P.A. 1996. Response of Vitis vinifera L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. South African Journal for Enology and Viticulture 17 (1):3-14.
- Nagaz K., Moncef M. M., Ben M. N. 2012. Effects of deficit drip-irrigation scheduling regimes with saline water on pepper yield, water productivity and soil salinity under arid conditions of Tunisia. Journal of Agriculture and Environment for International Development – JAEID, 106 (2): 85-103.
- Nederhoff , E. 2001. Light and Radiation in the Greenhouse. Galileo Services Ltd, New Zealand. <http://www.greenhouse.co.nz/bulletins>.
- Ogrosky H. O., y V. Mockus. 1964. Hydrology of agricultural lands. Secc. 21. En. Handbook of Applied Hidrology. Ed. Ven Te Chow. McGraw Hill. New York.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, E.I. y Unland, W.H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, Agrociencias 40 13-25. Montecillos, Edo. México.
- Ojeda, W., J. M. Angeles, y A. Rojano. 2003. Programación automática del riego bajo condiciones de invernadero. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación.

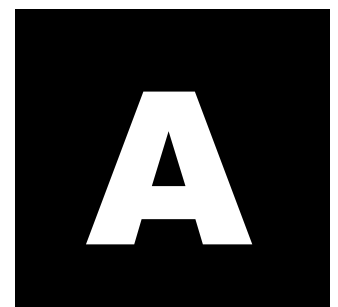
- En memorias del XII Congreso Nacional de Irrigación. ANEI2003 M7 T41.Zacatecas, Zac.
- Ojeda, W., P Martínez, y L. Hernández. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6 del libro “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”. Vol. II. Eds. A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W. 2004. Programación del riego bajo condiciones de invernadero. En notas del curso internacional de invernaderos. PUIMECI. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.
- Ojeda-Bustamante, W., Carrillo G. M., Martínez E. R. 2004. Calendarización de riego: teoría y práctica. IMTA México DF. 249 p.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes, D. C. Slack y M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53:251-261.
- Ortega, S. y Acevedo, C. 1999. Programación de Riego. Cartilla técnica Comisión Nacional de Riego y Universidad de Talca. 16 p.
- Ortega-Farias S., A. Oliosio, R. Antonioletti ,N. Brisson. 2004. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. *Irrig Sci*. 23: 1–9.
- Ortega-Farías, S. 1998. Demanda hídrica y programación del riego. Recursos Hídricos “Una visión moderna y sustentable”, editado por Varas, E. INIA-Quilamapu: 10-22.
- Ortega-Farias, S.R y Fuentes, S.1999. Validación de un modelo para estimar resistencia de la cobertura vegetal de tomate a la transferencia de vapor de agua caliente. *Ciencia e investigación agraria*. Vol 25: 151-155.
- Ortiz, S. C. A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. 3ª ed. Departamento de suelos, UACH. Chapingo Mex. 320 p.
- Palacios V. E., y A. Martínez. 1978. Respuesta en el rendimiento de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Palacios. V. E. 1998. ¿Porqué, Cuando y Cuanto y Como Regar?. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Mex. 163 pp.
- Penman, H. L. 1948, Natural evaporation from a open water, bare soil, and grass. *Proc. Royal Society London*, A193. London, England. pp. 120-145.
- Phene C.J., Howell T.A., 1984. Soil sensor control of high frequency irrigation. *Trans. ASAE.*, 27(2): 392-396.

- Phene, C. 1998. Riego por goteo subsuperficial. En notas del IV curso internacional de sistemas de riego. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación. 22 pp.
- Pizarro, F. 1996. Riego localizado de alta frecuencia. Mundi-Prensa, España. 513 p.
- PPI. Potash & Phosphate Institute. 1994. Soil Fertility Manual. Norcross, Georgia. EE.UU. 116 pp.
- Puustjärvi, V. 1994. La turba y su manejo en horticultura. Ediciones de Horticultura. España.
- Raviv M., Chen Y. e Inbar Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. In: The role of organic matter in modern agriculture. Editores: Y. Chen y Y. Avnimelech. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht. pp:257-287.
- Richie, J. T. 1973. Influence of the soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. Agron. J. 65:893-897.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.I.; Verma, S.B. 1983. Microclimate. The Biological Environment. 2ª ed. John Wiley & Sons.
- Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. J. Agric. Met. (Japan). 37: 9-17.
- Salazar, L. J., K. R. Thompson, y K. Crane. 1996. Computerized Irrigation Scheduling in The San Luis Valley Colorado. Proceedings of the International conference: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. ASAE. San Antonio Texas.
- Salazar, L., G. H. Hargreaves, R. K. Stutler. 1987. Irrigation Scheduling Manual. International Irrigation Center. Utah State University. Logan Utah. Pp 223.
- Saxton, K.E. *et al.* 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50(4):1031-1036.
- SCS. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology. Section 4. U.S. Soil Conservation Service. USA.
- SCS. 1991. Scheduling irrigation: a guide for improving irrigation water management through proper timing and amount of water application. SCS-USDA and ARS-USDA.
- Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2009. Fecha de Consulta; 12/02/09. <http://siap.sagarpa.com.mx>
- Shani U.; Xue S.; Gordin-Katz R.; y Warrick A.W. 1996. Journal of irrigation and drainage engineering. Volumen 122 N° 5, Sept-Octubre. 291-295p
- Sherry, W.J., Goldsberry, K.L. 1980. Carnation production responses to solar radiation transmitted through plastic greenhouse covers. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 105 (4): 579-582.

- Shuttleworth, W. J. 1993. Evaporation. Chapter 4. En Handbook of Hidrology. Ed. D.R. Maidment. McGraw Hill. Pp. 4.1-4.53
- Shuttleworth, W.J. y Gurney, R.J. 1990. The theoretical relationships between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116: 497-519.
- Shuttleworth, W.J. y Wallace, J.S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. of the Royal Meteorological Society* 111: 839-855.
- Sifuentes, I. E., Ojeda, B. W., Guerrero, E.M., y Valdez, C. J. 1988. El uso de parcelas de validación como herramienta de apoyo en la transferencia del sistema de calendarización del riego en tiempo real (SPRITER) en el Distrito de riego. En memorias del VIII Congreso Nacional de Irrigación. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación. Comarca Lagunera.
- Sifuentes, I.E., Ruelas, I.J.R., Talamantes, C.I., Palacios, M.C.A., López, V.B.E. 2013. Agro folleto: "El papel de la nutrición vegetal en el rendimiento de los cultivos". UAS-ESAVF. 4ª Edición. Guasave, Sinaloa, México. Pp 18
- Smajstrla, A.G., B. J. Boman, G.A. Clark, D.Z. Amán, D.J. Pitts y F.S. Zazueta. 1990. Evaluación en el campo de la uniformidad microirrigación aplicación. Servicio de Extensión Cooperativa de la Florida, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas de la Universidad de Florida, Gainesville, FL. Boletín 265.
- Smith, M. R. Allen, y L. Pereira. 1996. Revised FAO methodology for crop water requirements. Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation scheduling. 3-6 Nov. 1996. San Antonio, Texas, EE.UU.
- Stanghellini C., Kempkes F.L.K., Knies P., 2003. Enhancing environmental quality in agricultural systems. *Acta Hort.*, 609: 277-283.
- Stanghellini, C. 1998. Balance hídrico en invernaderos: su efecto sobre el microclima y las necesidades hídricas del cultivo. En Tecnología de invernaderos II. Curso superior de especialización. Editado por J. Pérez P. Y I. M Cuadrado G. Caja Rural de Almería, España. pp 45-62.
- Subbaiah, R. y K.A. Rao. 1994. Root growth simulation model under specified environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 119:898-904.
- Tarjuelo, M-B. J. M. 2005. EL RIEGO POR ASPERSION Y SU TECNOLOGIA (3ª ED.). S.A. MUNDI-PRENSA LIBROS 581 pags
- Thompson, A. L. D.L. Martin, J.M. Norman y T. A. Howell. 1996. Scheduling effect on evapotranspiration with overhead and below canopy application. Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation scheduling. 3-6 Nov. 1996. San Antonio, Texas, EE.UU. Pp. 182-188.

- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. R.* 38: 55-94.
- Tijerina, Ch. L. 1992. Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural. Diplomado. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.
- Topp, G. C., J. L. Davis y A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research.* 16:574-582.
- Tosso, J. y Ferreyra, R. 1988. *II Programación a través de bandeja. IPA La Platina N° 46.*
- Uchida-Frausto, H., J.G. Pieters, And J.M. Deltour. 2003. Modelling Greenhouse Temperature By Means Of Autoregressive Models. *Biosystem Engineering* 84121:147-157
- Van Hoorn, J. W. y van Alphen, J.G. 1994. Salinity control. En: *Drainage principles and applications.* ILRI publication 16. Segunda edición. Editado por H.P. Ritzema. Wageningen, Holanda.
- Waller, P. 2004. Microirrigación en invernaderos y sistemas de fertirrigación. En *memorias del curso internacional de invernaderos.* Universidad A. Chapingo. Tomo II. Chapingo, México.
- Ward, R.C. 1967. *Principles of hydrology.* McGraw-Hill, New York, USA. 403 pp.
- Warrick, A. 1997. *Soil water dynamics.* Notas de clase SW-605. Universidad de Arizona. Tucson, Arizona. EE.UU.
- Whright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division of the ASCE.* 108:57-74.
- Wild, A. 1993. *Soils and the environment: an introduction.* Cambridge University Press. 287 pp. Cambridge, Gran Bretaña.
- Wright, J.L. 1996. Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. *Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling.* 3-6 Nov. 1996. San Antonio, Texas, EE.UU. pp. 133-140.
- Zazueta, F.S. *Microirrigación.* ICFA International, Guadalajara, México, 1992. 212 p.

Anexo
Estaciones Agrometeorológicas



ANEXO A

ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

Helene K. Unland Weiss, Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez

A.1 INTRODUCCIÓN

El ambiente en el cual los cultivos se desarrollan no siempre es el deseable para obtener rendimientos máximos. Los agricultores siempre han buscado proteger a los cultivos de las inclemencias del clima. El uso de cortinas rompevientos alrededor de una parcela es una de las técnicas más antiguas para modificar el microclima de un cultivo.

El estudio de los efectos meteorológicos en los cultivos es muy complejo, principalmente debido a la interrelación de un gran número de factores. El grado de influencia de los factores depende en gran medida de la etapa fenológica del cultivo y del microclima imperante alrededor de la planta.

Tradicionalmente, las necesidades de riego de los cultivos se habían calculado con base en tablas de uso consuntivo obtenidas de promedios diarios meteorológicos, usualmente restringidos a la temperatura y humedad ambiental, provenientes de estaciones meteorológicas muchas veces a decenas de kilómetros de distancia del sitio de interés. Afortunadamente, los adelantos tecnológicos recientes en sensores y controles, han promovido mejores sistemas para verificar en forma más precisa y casi continua el tiempo atmosférico de vital importancia en varios procesos de interés agrícola como la evapotranspiración. Lo anterior ha propiciado el resurgimiento de ecuaciones más precisas, como las ecuaciones tipo Penman, para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos, que ante la gran cantidad de datos meteorológicos que necesitan, permanecían olvidadas.

A.2 REDES DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

En los últimos años se han establecido redes de estaciones para monitorear las variables meteorológicas en varias partes de las regiones agrícolas del mundo. Por ejemplo la red CIMIS (California Irrigation Management Information System) consta de 85 estaciones climatológicas automatizadas operadas desde 1982 por la Universidad de California. El acceso de la información está disponible vía telefónica en la computadora central del sistema CIMIS o vía INTERNET. La información se procesa de la siguiente forma a las 12 de la noche la computadora central se comunica con todas las estaciones de la red por medio de llamadas telefónicas para tener la

información meteorológica de las últimas 24 horas. Una vez que se ha colectado la información meteorológica, se revisa la calidad de los datos y calcula la evapotranspiración de referencia (ET_0) en forma horaria y diaria usando una ecuación tipo Penman.

Existen otras redes como la red agrometeorológica AZMET (Arizona Meteorological Network) operada por la Universidad de Arizona; la red MESONET operada por la Universidad de Oklahoma que tiene características similares a la red CIMIS. En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (CNA) instalaron una red agrometeorológica nacional (RAN) que consiste de 45 estaciones distribuidas en los principales distritos de riego del país (1997).

El éxito de la operación de una estación agrometeorológica automatizada depende de la aplicación, potencialmente una estación puede ser una excelente herramienta para:

- ✓ Estimar las variables meteorológicas de interés agrícola
- ✓ Calendarizar el riego
- ✓ Pronosticar la aparición de plagas y enfermedades
- ✓ Enviar señales de condiciones meteorológicas adversas en detrimento de la eficiencia de aplicación de insumos agrícola
- ✓ Pronosticar y darle seguimiento en tiempo real a heladas
- ✓ Estimar la duración de las fases fenológicas usando el concepto los Días Grado Crecimiento
- ✓ Generación de mapas de riesgos de sanidad vegetal a nivel espacial y temporal

Las estaciones por sí solas no resuelven los problemas, proporcionan una serie de datos que son de gran utilidad en la medida que expertos en riego, agrometeorología, fitopatología y agronomía las usen para la toma de decisiones relacionadas con su campo de especialización.

A.3 DESCRIPCIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Las estaciones agroclimáticas automatizadas están equipadas con una serie de sensores conectados a un microprocesador (dataloger) que monitorea y almacena valores de las variables meteorológicas a intervalos de tiempo predefinidos de acuerdo a un programa residente en su memoria ejecutándose indefinidamente. Las estaciones cuentan con un sistema de telecomunicación por radio, teléfono o celular para el envío de datos meteorológicos a una computadora para su procesamiento posterior y calcular las demandas hídricas de los cultivos en forma casi continua en las parcelas del distrito de riego.

El juego de sensores de una estación agrometeorológica típica consiste en los siguientes sensores:

- ✓ Piranómetro sensor para medir la radiación

- ✓ Psicrómetro sensor de humedad del aire
- ✓ Termómetro sensor de temperatura del aire
- ✓ Anemómetro para medir la velocidad del aire
- ✓ Veleta para medir la dirección del aire
- ✓ Pluviómetro para medir la lluvia
- ✓ Sensor de temperatura del suelo (opcional)

Los sensores electrónicos constan principalmente de dos componentes: un dispositivo que mide la variable de interés, y un traductor que convierte la variable medida en una cantidad eléctrica (voltaje, corriente, resistencia, frecuencia o amplitud).

La **Figura A.1** muestra los componentes básicos de una estación meteorológica con fines de estimación de la evapotranspiración de referencia.

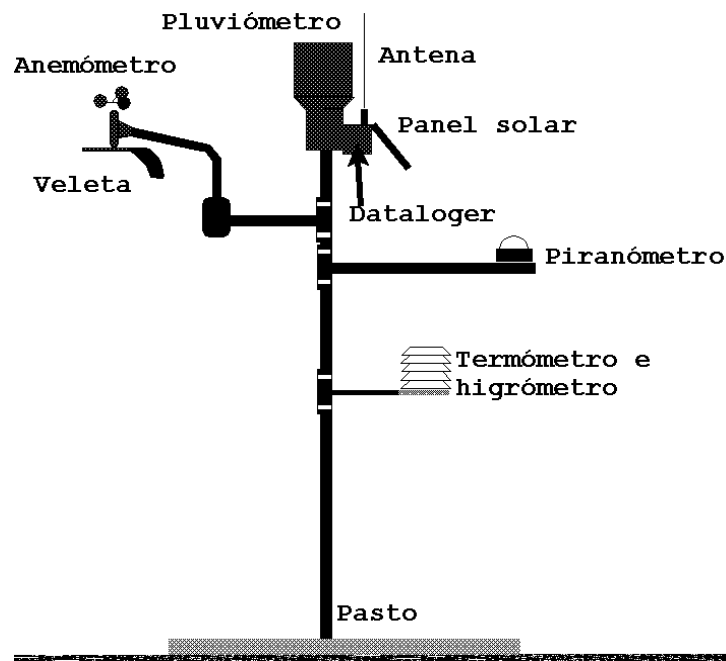


Figura A.1 Estación agrometeorológica automatizada.

Las estaciones agrometeorológicas típicas instaladas como parte de la Red Agrometeorológica Nacional (RAN) deben tener la capacidad de medir los siguientes parámetros meteorológicos, que a su vez son necesarios para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_o) usando el método de Penman-Monteith: radiación solar (R_s), temperatura del aire (T_a), humedad relativa, velocidad y dirección del viento, y precipitación. Para mejorar la precisión de los valores de ET_o calculados, se pueden añadir sensores de radiación neta (R_n), de humedad y temperatura del suelo en dos profundidades, y un sensor del flujo de calor en el suelo (G). Si la estación no cuenta con sensores de radiación neta y de flujo de calor en el suelo, estos valores se estiman usando las medidas de la radiación solar, la humedad relativa, y la temperatura del aire.

Por otro lado, es importante tomar en cuenta la variación espacial de la radiación neta, la temperatura y humedad del suelo, sobre todo si el área de influencia de la

estación no es homogénea. Por ejemplo si existe variación en el tipo de cultivo y la estructura del suelo (textura y tipo del suelo) se deben instalar los sensores que midan R_n , G y la humedad del suelo en lugares representativos del área de influencia. Este último proceso implica una fuerte inversión en la compra de sensores adicionales, además que es bastante difícil a mantener un sensor de radiación neta funcionando adecuadamente por largos periodos (Snyder *et al.*, 1985).

Por lo tanto, para estimar la ET_o normalmente se usa solamente un sensor de radiación solar en combinación con los otros sensores estándares de la estación. En áreas con poca nubosidad y presión de vapor relativamente constante, para las horas de luz diaria la radiación neta R_n se estima con bastante precisión usando solamente R_s (Fritschen, 1967), debido a que el balance de radiación terrestre es insignificante en relación con el balance de radiación solar, y casi no cambia con el tiempo. En regiones con nubosidad se deben usar métodos más complicados incluyendo mediciones de R_s , y T_a , el cálculo de la presión de vapor actual e , y estimaciones del albedo de la superficie y de la nubosidad (Dong *et al.*, 1992). Las estimaciones de la ET_o se verifican con mediciones representativas de la humedad del suelo. Estas mediciones del suelo se efectúan mediante sensores portátiles del tipo TDR (Time Domain Reflectometer), los cuales se pueden mover fácilmente de un lugar al otro, y así alcanzar a una buena cobertura del área de influencia de cada estación.

Normalmente es suficiente que por cada red regional, una de las estaciones este equipada con un sensor de presión atmosférica, ya que dicha presión no varía mucho y puede estimarse para las otras estaciones (tomando en cuenta la elevación sobre el mar).

Finalmente, si el usuario quiere usar una estación para fines de pronóstico de enfermedades y plagas específicas para ciertos cultivos, se deben instalar sensores adicionales de temperatura del aire, humedad relativa y humedad en las hojas. Nótese que no es posible utilizar el mismo sensor de temperatura del aire y humedad relativa para el cálculo de ET_o , y para el pronóstico de plagas y enfermedades, porque para calcular la ET_o se requiere una altura de referencia por arriba de la superficie promedio del cultivo (definido en la sección intitulada "Alturas estándar de los sensores") mientras que el pronóstico de plagas y enfermedades necesita medidas de la temperatura del aire, humedad relativa y humedad en las hojas dentro del follaje del cultivo, lo cual implica que la altura de estos sensores debe de cambiar periódicamente a medida que crecen las plantas.

A.4 ESTÁNDARES PARA ALTURAS Y EXPOSICIÓN DE LOS SENSORES METEOROLÓGICOS

A.4.1 Estándares Internacionales

Los datos recolectados de las estaciones climatológicas automatizadas (ECA) tienen una multitud de aplicaciones. Con frecuencia las aplicaciones particulares pueden tener requerimientos específicos, los cuales imponen la altura y/o la exposición de los

sensores. Por lo tanto, no se puede definir un estándar con aplicación universal para las alturas de los sensores y las prácticas de instalación.

La **Tabla A.2** muestra las alturas estándares de los siete sensores meteorológicos más comunes en las ECA, que fueron publicados por cuatro organismos nacionales e internacionales, así como el uso de cinco de las redes “largas” nacionales de estaciones automatizadas en los E.U.A. (Meyer y Hubbard, 1992).

Tabla A.2. Alturas estándares de instalación de sensores usados por cuatro organismos internacionales y nacionales, y en cinco de las “grandes” redes nacionales de estaciones automatizadas en los E. U. A. También incluye las alturas de referencia recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) para ECA usadas para el monitoreo general del clima y del medio ambiente y en agrometeorología (traducción de la versión original en inglés. Según Meyer y Hubbard, 1992, con datos adicionales para la FAO, de Doorenbos, 1976).

Estándares Nacionales/Internacionales para Alturas de Instalación de Sensores Meteorológicos						
Orga- nismo	Temp. del Aire	Temp. del Suelo	Humedad Relativa	Velocidad/ Dirección del Viento	Precip.	Radiación Solar
WMO ¹	125-200 cm	5, 10, 20, 50, 100 cm	125-200 cm	1000 cm	30 cm ²	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
FAO ³	150-200 cm	5, 10, 20, 50, 100 cm	150 cm	200 cm	30 cm ⁴	200 cm
UKMO ⁵	125-150 cm	?	125-150 cm	1000 cm	30 cm ²	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
NWS/ NOAA ⁶	150 cm	10 cm	150 cm	900-1000 cm	lo más cerca a la superficie posible	

¹ Organismo Meteorológico Mundial (World Meteorological Organization, 1969)

² hacia mas arriba donde condiciones no permiten instalación en esta altura

³ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (United Nations Food and Agriculture Organization, Doorenbos, 1976)

⁴ Niveles mas altas aceptable en regiones con nieve significativa.

⁵ Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, 1956)

⁶ Servicio Meteorológico Nacional/Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Weather Service/National Oceanic and Atmospheric Administration, 1987)

Alturas de Instalación de Sensores Meteorológicos para “Grandes” Redes Seleccionadas de Estaciones Climatológicas Automatizadas (ECA) en los E. U. A.						
Red de ECA	Temp. del Aire	Temp. del Suelo	Hum. Relativa	Velocidad/ Dirección del Viento	Precip.	Radiación Solar
RAWS ⁷	200 cm	10-50 cm	200 cm	600 cm	150-200 cm	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
MESONET ⁸	150 cm	10 cm	150 cm	1000 cm	lo más cerca a la superficie posible	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
AWDN ⁹	150 cm	10 cm	150 cm	300 cm	100 cm	200 cm, o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
ICN ¹⁰	200 cm	10, 20 cm	200 cm	1000 cm	100 cm	200 cm, o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
CIMIS ¹¹	150 cm	15 cm	150 cm	200 cm	100 cm	200 cm, o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
Alturas de Instalación de Sensores Meteorológicos Recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC)						
Organismo	Temp. del Aire	Temp. del Suelo	Hum. Relativa	Velocidad/ Dirección del Viento	Precip.	Radiación Solar
AASC	150 cm	10 cm	150 cm	300 cm	100 cm ⁴	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor

Se puede apreciar fácilmente que las alturas de instalación de los sensores varían mucho, dependiendo del objetivo de la red de ECA instalada. La diferencia principal entre las recomendaciones de los diferentes organismos es la altura del anemómetro y pluviómetro. La recomendación de la FAO para la altura del anemómetro es como resultado de su uso frecuente en el algoritmo de Penman (1948) para la estimación de la evaporación potencial E_p , la cual requiere mediciones de la velocidad del viento promedio diaria a una altura de 2 metros.

⁷ Estación Meteorológica Automatizada Remota (Remote Automated Weather Station, Finklin y Fischer, 1990)

⁸ Red de Meso-Escala (Mesoscale Network, Crawford, 1991)

⁹ Red Automatizada de Datos Meteorológicos (Automated Weather Data Network, Hubbard *et al.*, 1983)

¹⁰ Red Climatológica de Illinois (Illinois Climate Network, Hollinger y Reinke, 1990)

¹¹ Sistema de Manejo de Riego e Información de California (California Irrigation Management and Information System, Snyder, en comunicación personal con los autores originales de la Tabla, 1991)

La recomendación de la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) en los E. U. A. para la altura del anemómetro es de 3 metros (ver **Tabla A.2** ; sin embargo, no tiene una precedencia histórica (Snyder et al, 1996). Según la AASC, la altura de 3 metros representa “un balance razonable entre el gasto de construir una torre alta y el problema de la exposición que se incrementa a alturas más bajas” (AASC, 1985). Sin embargo, el estándar de exposición para anemómetros puede tener poca influencia en aplicaciones como la ecuación de Penman. En 1990, Bausch descubrió que la velocidad del viento (U) medida en alturas de 3 y 2 metros era diferente en aproximadamente 9 por ciento, y que se pueden ajustar las medidas de U en 3 metros al equivalente para 2 metros usando la función estándar de potencia con un error de 5 por ciento o menos (Snyder et al., 1996).

La altura del pluviómetro afecta el volumen total de precipitación (PPT) medido, ya que los pluviómetros instalados a mayores alturas estarán expuestos a velocidades del viento más altas, produciendo una deformación más grande del flujo del aire cerca del orificio. La forma del terreno (plano o irregular) y las características del paisaje también afectan el flujo del aire. La altura más recomendada por los organismos internacionales y nacionales es de 30 cm (WMO, UKMO, FAO; incluyendo la NWS/NOAA que recomienda instalar el pluviómetro lo más cerca a la superficie posible, ver **Tabla A.2**). De cualquier modo, el estándar más usado en la práctica es de 100 cm de altura (usado en las redes de AWDN, ICN, CIMIS entre otros, ver **Tabla 1** y **Figura 1**). Esta altura minimiza los problemas de chapoteo de precipitación líquida de las áreas cercanas al pluviómetro ; por otro lado en zonas más frías, los efectos de la acumulación de nieve pueden enmascarar la medición real, por esta razón la AASC recomienda 100 cm como altura estándar (1985).WMO y UKMO permiten modificaciones de su altura estándar de 30 cm para instalaciones donde esta altura puede causar problemas de salpicaduras, mientras la FAO únicamente hace excepciones para evitar ventiscas (acumulaciones de nieve;**Tabla A.2**).

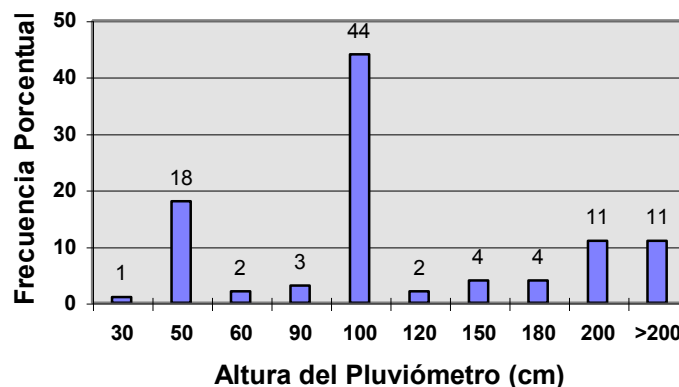


Figura A.2. Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de pluviómetros en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).

En todo caso, no es probable que estas diferencias en alturas recomendadas para el pluviómetro puedan causar diferencias mayores al 10 por ciento en la precipitación medida, por lo tanto, el criterio más importante puede ser que todos los pluviómetros en una red de estaciones tengan la misma altura. Los resultados del estudio de Bausch (1990) muestran que la temperatura del aire (T_a) medida en alturas de 1.5 y de 2.0 metros pueden variar significativamente: Las T_a máximas y mínimas diarias en los dos niveles difirieron 1.8 y 2.4 °C, respectivamente. Diferencias en este orden de magnitud son significativas para fines climatológicas así como para ciertos fines agrícolas, como son modelos de heladas y días grados crecimiento (DGC), y por lo tanto se debe de tomar en cuenta el objetivo de la estación para decidir la altura del termómetro (Snyder et al., 1996).

A.4.2 Estándares para Alturas y Exposición de Sensores en las EAA de la Red Agroclimatológica Nacional

Para definir los estándares de las alturas y exposiciones de sensores que se recomienda para utilizarse en todas las redes de EAA en la República Mexicana y específicamente, en las zonas agrícolas más importantes se deben de tomar en cuenta los siguientes criterios: (1) la aplicación más amplia posible de la misma serie de estándares en las zonas agrícolas de otros países, para facilitar comparaciones sencillas entre los datos agroclimatológicos generados en las diferentes regiones; (2) alturas convenientes para facilitar el mantenimiento frecuente de los sensores; sin embargo, manteniendo la posibilidad del uso de las medidas para el cálculo de variables derivadas como la evapotranspiración de referencia (ET_o). La serie de estándares definido por la AASC (1985) cumple con más fidelidad con los criterios anteriores y por lo tanto es la más recomendable, con algunas modificaciones, para el estándar para la Red Agroclimatológica Nacional (RAN) de México. La magnitud de muchas variables meteorológicas, como es bien conocido, es muy relacionada con la altura de medición de estas mismas variables. Por esta razón, la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) recomienda una serie de estándares para aplicaciones donde no hay requerimientos específicos de alturas y exposiciones de sensores, “para proveer alguna medida de uniformidad entre las diferentes redes en proceso de instalación” (AASC, 1985). Estos estándares son dirigidos a las necesidades de monitoreo rutinario del clima, la agrometeorología y aplicaciones relacionadas.

Las únicas diferencias entre la serie de estándares de la AASC y de la RAN se encuentran en que se permite usar una altura alternativa para el pluviómetro y los sensores de temperatura del aire y humedad relativa, los cuales estaban normalmente instalados a una altura de 3 metros en la mayoría de las estaciones de la RAN ya existentes; lo anterior para facilitar la continuidad de las medidas históricas tomados en estas estaciones, especialmente donde el diseño de la estación no permite un ajuste fácil en la altura de los sensores. En las secciones siguientes se explica en más detalle la serie de estándares de la RAN.

Tabla A.3 Alturas estándares de instalación de sensores usados por la RAN.

Sensor	Altura Estándar	Comentario
Termómetro ambiental y Higrómetro	1.5 m	Altura de 3m aceptable en estaciones ya establecidas para facilitar continuidad en los datos históricos
Piranómetro	En la parte más alta de la estación, evitando sombras	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
Anemómetro y Veleta	3 m	Altura de 2 m aceptable
Pluviómetro	1 m	Altura de 3m aceptable en estaciones ya establecidas para facilitar continuidad en los datos históricos

A.4.2.1 Velocidad y Dirección del Viento

A. Altura de los sensores

Normalmente, los sensores de velocidad y dirección del viento se instalan juntos. La altura estándar del anemómetro y de la veleta es de 3 ± 0.1 metros.

B. Exposición de los sensores

Los sensores se deben ubicar lo más alejado posible de cualquier objeto, se recomienda que la distancia al objeto más cercano sea de al menos diez veces la altura de dicho objeto.

C. Comentarios

De acuerdo con un estudio realizado por Meyer y Hubbard (1992), la altura de 3 metros se utilizó en 31 % de las ECA ubicadas en las redes de Norte América, mientras que alturas de 2 y 10 metros se usaron en 25 y 31 % de las estaciones, respectivamente (**Figura A.3**). Para la RAN, no se recomiendan alturas mayores a los 3 metros para los sensores del viento, porque dificultarían su mantenimiento. Además, no se recomiendan alturas más bajas, como por ejemplo de 2 metros (recomendado por la FAO), porque la aplicación más común de los datos derivados de estaciones de la RAN, es el cálculo de la ETo basado en la ecuación de Penman-Monteith, la cual es insensible a errores en la velocidad del viento.

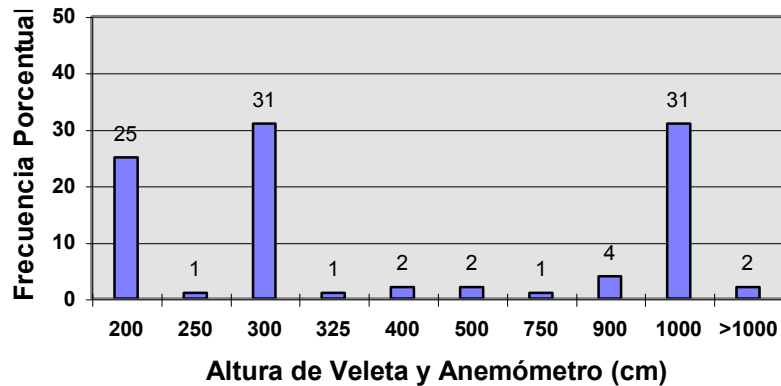


Figura A.3. Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de anemómetros y veletas en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).

A.4.2.2 Temperatura y Humedad Relativa

A. Altura de los sensores

La humedad relativa es una función de la temperatura del aire, por lo tanto, estos sensores deben estar colocados a una altura estándar de 1.5 ± 0.1 m. (Altura opcional de $3 \text{ m} \pm 0.1$ m para estaciones de redes ya existentes).

B. Exposición de los sensores

Los sensores deben ser protegidos de radiación solar directa, y de radiación de onda larga emitida por la tierra, edificios y otros objetos. La protección debe permitir el flujo libre del aire por encima del sensor.

C. Comentarios

Los sensores de la temperatura del aire y de la humedad relativa deben estar instalados juntos para facilitar las medidas simultáneas requeridas para el cálculo de la presión de vapor actual y de la temperatura del punto de rocío, parámetros importantes para la ETo. Opcionalmente, se permite dejar las sensores de temperatura del aire y humedad relativa ya instaladas a una altura de 3 metros, para facilitar la continuidad de las medidas históricas tomadas en estas estaciones, especialmente donde el diseño de la estación no permite un ajuste fácil en la altura de los sensores.

Entre todas las estaciones instalados en las redes de Norte América, en 55 % de ellas se instalaron los sensores a una altura de 1.5 m, mientras que en el 28% de ellas se instalaron a 2.0 m (**Figura A.4**). Los sensores instalados a alturas mayores de 5 metros se usan en proyectos con objetivos específicos, o se encuentran en estaciones ubicados en terrenos accidentados o con vegetación alta (árboles).

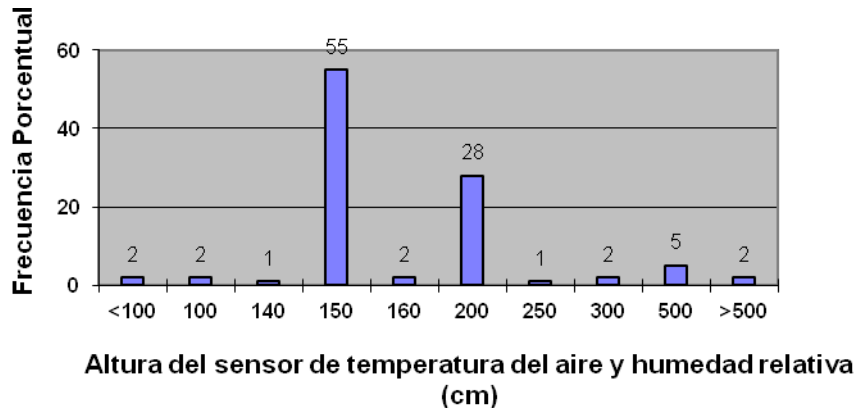


Figura A.4. Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).

A.4.2.3 Precipitación

A. Altura del sensor

La altura estándar del pluviómetro es de 1.0 ± 0.1 m. (Altura opcional de $3 \text{ m} \pm 0.1$ m para estaciones en redes ya existentes).

B. Exposición del sensor

La distancia entre el pluviómetro y cualquier obstrucción debe ser cuatro veces la altura del objeto. El orificio del sensor debe estar instalado en una posición horizontal.

C. Comentarios

Casi todos los pluviómetros instalados en las redes del Norte de América se encuentran a alturas de 2 metros o menos. Las alturas más comunes son: 0.5, 1.0, y 2.0 metros, representando 18, 44 y 11 %, respectivamente, de las estaciones que miden la precipitación (**Figura A.2**). Los pluviómetros instalados a alturas de más de 2 metros usualmente se encuentran en terreno especial, o en clima frío.

Opcionalmente, se permite dejar los sensores de precipitación ya instaladas en una altura de 3 metros, para facilitar la continuidad de las medidas históricas tomadas en estas estaciones, especialmente donde el diseño de la estación no permite una ajuste fácil en la altura de los sensores.

A.4.2.4 Radiación Solar

A. Altura del sensor

El piranómetro se debe instalar a cualquier altura, especialmente donde no se encuentre ninguna obstrucción que pueda dar sombra al sensor.

B. Exposición del sensor

Según la recomendación de la AASC (1985), cualquier obstáculo debe estar a más de 10° arriba del horizonte, con respeto al sensor (Snyder *et al.*, 1996).

C. Comentarios

En la mayoría (72 %) de las instalaciones, el piranómetro se encuentra en una altura de 2 metros; en 88% de las estaciones equipadas con sensores de radiación solar, la altura varía de 2 a 3 metros (**Figura A.5**).

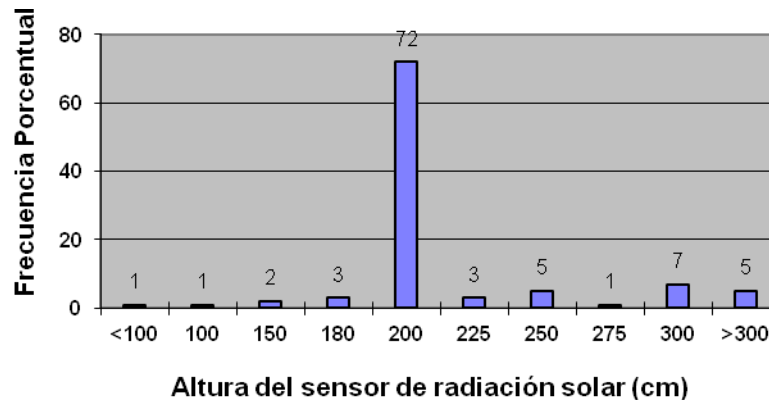


Figura A.5. Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación del sensor de radiación solar en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).

A.4.2.5 Temperatura del Suelo (sensor opcional)

A. Profundidad del sensor

La profundidad estándar para medir la temperatura del suelo es de 10 ± 1 cm debajo de la superficie del suelo.

B. Exposición del sensor

Se debe mantener una superficie plana y no perturbada de un metro cuadrado arriba del sensor. Se debe dejar esta área en un estado consistente con el tipo de superficie de interés (normalmente una superficie desnuda o con cubierta de pasto).

C. Comentarios

El estándar de 10 cm de profundidad es consistente con las recomendaciones de la AASC y NWS/NOAA. Para estudios específicos, profundidades adicionales, como aquellas recomendadas por la FAO y WMO (**Tabla A.2, Figura A.6**), pueden ser útiles.

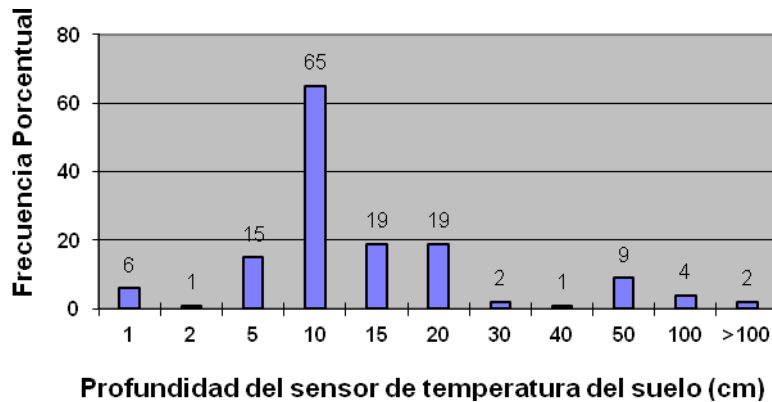


Figura A.6 Distribución discreta de la frecuencia de profundidades de instalación del sensor de temperatura del suelo en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés en Meyer y Hubbard, 1992).

A.4.2.6 Humedad del Suelo (*sensor opcional*)

A. Profundidad del sensor

La profundidad recomendada para el sensor es de 10 ± 1 cm.

B. Exposición del sensor

Para instalaciones fijas, se debe mantener una superficie plana y no perturbada de un metro cuadrado arriba del sensor. Se debe dejar esta área en un estado consistente con el tipo de superficie de interés (normalmente una superficie desnuda o con cubierta de pasto). Si el sensor es portátil, se deben seleccionar los lugares más representativos para la región e insertar el sensor en el suelo con un mínimo de perturbación para que éste mantenga contacto con el suelo sin crear baches.

C. Comentarios

La profundidad puede variar de acuerdo con el tipo del sensor usado, dependiendo si mide en un solo punto (bloque de yeso) o si integra a través de la longitud del sensor (TDR).

A.4.3 Criterios de Precisión

La precisión requerida para mediciones de variables meteorológicas varía con el objetivo específico de dichas medidas. En la mayoría de los casos, la precisión declarada debe asegurar la compatibilidad de los datos en tiempo y espacio. La **Tabla A.4** muestra las recomendaciones de la comisión técnica para sistemas básicos de la WMO para la precisión requerida por los sensores en medidas superficiales tomadas para fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas (WMO, 1983). Para las estaciones de la RAN, se adoptan los criterios establecidos por la WMO para las ECA como criterios mínimos, pero se reconoce que sería preferible alcanzar a los criterios establecidos para fines de agrometeorología, siempre que sea posible y cuando no haya criterios definidos para las ECA (como para la radiación solar y la presión atmosférica).

Tabla A.4 Resumen de precisiones requeridas para medidas superficiales para fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas (ECA; adaptación y traducción de la versión original en inglés de partes seleccionadas de las tablas 2 y 4 en WMO, 1983).

Sensor	Precisión requerida para fines de :	
	a) Agrometeorología	b) ECA
Presión atmosférica		± 0.1 kPa
Velocidad del viento	± 10% para velocidades >1 m s ⁻¹	± 2 m s ⁻¹ para velocidades <20 m/s ⁻¹ ; ± 10 % para velocidades >20 m s ⁻¹
Dirección del viento	± 10 °	± 20 °
Temperatura del aire	± 0.1 °C	± 1°C
Temperatura del punto de rocío	± 0.1 °C	± 1°C para déficit de temp. rocío < 4 °C ; ± 2°C para déficit de temp. rocío > 4 °C
Humedad relativa	± 1 %	suficiente para resultar en las precisiones requeridas para la presión de vapor
Presión de vapor	equivalente a ± 0.1 °C en la temperatura del punto de rocío	equivalente a ±1 o 2 °C en la temperatura del punto de rocío para déficit de temp rocío de <4 o >4 °C, respectivamente
Radiación solar	± 1 MJ m ⁻² d ⁻¹	
Precipitación acumulada (ppt)	0.1 mm para ppt ≤ 10 mm ; 2% para ppt > 10mm	± 0.5 mm para ppt ≤ 5mm ; ± 10% para ppt > 5mm

A.4.4 Criterios de Ubicación

A.4.4.1 Representatividad espacial de las mediciones de las ECA

Las mediciones de las ECA se utilizan para la estimación de flujos de energía superficiales, así como para determinar las condiciones de las coberturas vegetales, generalmente sobre superficies más extensas. La amplitud de la escala de representatividad de las mediciones depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar: la uniformidad del tipo de superficie, la topografía, la humedad del suelo, y la variabilidad de la misma. Por ejemplo, se ha observado que la radiación solar es más uniforme espacialmente que la precipitación. Una herramienta para analizar la uniformidad de las superficies a gran escala son las imágenes de satélite, sin embargo, se requiere de una verificación mediante una comparación con las mediciones independientes efectuadas a partir de las ECA. A escala local, la influencia de las superficies “vientos arriba” sobre la temperatura y humedad del aire determina directamente el área representada por tales mediciones. La superficie de influencia “vientos arriba” depende principalmente de la altura de la medición, de la rugosidad de la superficie y de la estabilidad atmosférica. Dicha área de influencia es muy difícil de estimar, aun cuando la superficie local sea razonablemente uniforme (Tanner, 1990). Los trabajos de Leclerc y Thurtell (1990), de Schuepp *et al.* (1990) y más recientemente, de Desjardins *et al.* (1992), proporcionan comparaciones útiles entre la amplitud y la importancia relativa de las superficies “vientos arriba” en las mediciones de flujos a diferentes alturas “vientos abajo”.

La **Tabla A.5** muestra la “huella” de la superficie “vientos arriba” la cual contribuye el 50 y el 80 por ciento del flujo, a diferentes alturas de medición y diferentes factores de rugosidad, bajo una estabilidad atmosférica neutral. Este trabajo muestra que la relación frecuentemente utilizada de la distancia de influencia “vientos arriba”, a altura de medición de 100 a 1, puede ser errónea en superficies planas o bajo condiciones atmosféricas estables. El área de influencia es mucho mayor durante las inversiones nocturnas estables que durante las condiciones inestables diurnas. Recíprocamente, la reducción del efecto sobre superficies rugosas indica que para parcelas boscosas es posible obtener una representatividad aceptable en mediciones, con una relación inferior de 100 a 1 (Tanner, 1990).

Tabla A.5. Distancia de influencia “vientos arriba” (m) que contribuye el 50 o el 80 por ciento del flujo para diferentes alturas de medición (m) y factores de rugosidad z_0 (m) bajo condiciones de estabilidad neutral. Los factores de rugosidad son 0.13 veces la altura de la cubierta vegetal (Leclerc y Thurtell, 1990)

Altura (m)	Distancia de influencia “vientos arriba” (m) para 50% del flujo			Distancia de influencia “vientos arriba” (m) para 80% del flujo		
	$z_0=0.006$	$z_0=0.06$	$z_0=0.65$	$z_0=0.006$	$z_0=0.06$	$z_0=0.65$
3	95	50	-	330	140	-
9	400	110	-	1135	715	-
20	800	550	215	2470	1590	680

A.4.4.2 Recomendaciones para la ubicación de ECA

La representatividad de los datos provenientes de una estación meteorológica ha sido estudiado por Allen *et al.*, (1983) que encontraron que la temperatura del aire en áreas irrigadas puede estar entre 2 °C y 6 °C abajo de las encontradas en parcelas no cultivadas.

Diferentes recomendaciones se deben seguir en la localización de estaciones con fines de calendarización de riego:

- Localizar la estación dentro de una zona de riego.
- Evitar obstrucciones que restrinjan el movimiento natural del viento en un radio de 100 m.
- Localizarla en una zona que tenga la menor variación en la altura y tipo de cultivos alrededor de la estación (poca rotación de cultivos).
- Localizarla a una distancia mayor de 200 m de corrientes de agua y a 1000 m de grandes cuerpos de agua superficiales.
- Evitar la aplicación de agroquímicos cerca de los sensores ya que se pueden degradar y reducir su vida útil.
- Mantener una cobertura vegetal alrededor de la estación para reproducir las condiciones del cultivo de referencia que se quiere estimar. La **figura A.7** presenta una estación meteorológica con una cobertura vegetal permanente.



Figura A.7 Estación meteorológica en una zona de riego.

Tomando en cuenta las problemas de derivar exactamente la superficie “vientos arriba”, la cual se debe considerar como la fuente de las mediciones tomadas en los sensores de una estación, es bastante difícil definir los criterios necesarios para ubicar las ECA en el campo en la posición más representativa para las condiciones locales. La altura estándar máxima recomendada para las estaciones de la RAN es de 3 metros (sensores del viento). Por lo tanto, para una altura de 3 metros, en el peor de los casos con una superficie de baja rugosidad ($z_0 = 0.006$) y condiciones atmosféricas estables (como se encuentran normalmente en la noche), la distancia de influencia “vientos arriba” para el 80 por ciento del flujo es de 330 m (Tabla 3). Es decir, la estación debe

estar instalada en un lugar donde no se encuentra ningún obstáculo, especialmente en la dirección de los vientos prevalecientes, por lo menos de 350 a 400 m de distancia (tomando en cuenta que el 20 por ciento de los flujos se origina a una distancia mayor de 330 m).

En la práctica, casi nunca se encuentra este lugar ideal, aunque se deben satisfacer los otros requisitos descritos en esta sección. Afortunadamente, la superficie de la cubierta vegetal en la dirección “vientos arriba” de la estación normalmente tiene una rugosidad mayor, y durante el día, cuando la evapotranspiración es máxima, usualmente la atmósfera es inestable. Entonces para fines del cálculo de la ET_o se espera que será suficiente una superficie “vientos arriba” ininterrumpida más pequeña en la mayoría de los casos.

En resumen, se recomienda ubicar la estación en una superficie plana y representativa de la agricultura local (Newman *et al.*, 1959; Doorenbos, 1976), con cubierta de pasto o de alfalfa corto y bien regado, de extensión a menos 10 x 10 metros, pero de preferencia de 50 x 50 m (Doorenbos, 1976). Se deben evitar lugares bajos y obstáculos tales como edificios, árboles o maquinaria, los cuales pueden dar sombra a los sensores e interrumpir el flujo libre del viento. La estación se debe ubicar a una distancia de por lo menos siete a diez veces la altura de cualquier obstáculo grande (dos a tres veces para obstáculos menores, como arbustos, Newman *et al.*, 1959). La superficie “vientos arriba” deberá ser cultivada durante la temporada de crecimiento, de preferencia con un cultivo de cobertura completa y altura corta, como son pasto o alfalfa. De cualquier modo, se debe considerar el cambio en las propiedades de la superficie “vientos arriba” con el ciclo del cultivo (desde el crecimiento hasta la cosecha), además con la rotación de los cultivos (Brown *et al.*, 1990).

Por lo tanto, no se debe ubicar la estación cerca de cultivos con gran variabilidad de altura, tales como el maíz y el sorgo. Tampoco se recomiendan sitios con niveles altos de radiación electromagnética, por ejemplo: torres de microondas, de ondas de radio, de televisión o de alto voltaje, porque pueden afectar el funcionamiento de los sensores y los otros instrumentos electrónicos (Snyder *et al.* 1996). Finalmente, se debe instalar la estación lejos de carreteras, debido a que éstas pueden causar cambios en el microclima y generar depósitos excesivos de polvo en los sensores. Por otro lado, es necesario que la estación se ubique en lugares con baja probabilidad de vandalismo, o donde no pueda ser dañada por animales. Lo anterior se puede prevenir si se instala una protección alrededor la estación, la cual no debe interferir con el flujo libre del viento; de ser posible se recomienda la contratación de vigilancia continua.

A.4.5 Mantenimiento de las ECA

Para que el sistema de medición funcione de manera óptima, se debe definir un plan de mantenimiento de las ECA, lo cual permite prevenir el deterioro de los sensores y de los otros equipos instalados en el campo. Lo anterior con fines de mantener la precisión de los sensores y la calidad alta de los datos recolectados de las ECA. En su estudio de 1992, Meyer y Hubbard muestran que la mayoría de los operadores de ECA en Norte América dan mantenimiento a sus estaciones de manera regular. Los

intervalos de mantenimiento más frecuentemente encontrados son semanales y mensuales (**Figura A.8**). Muchos otros operadores dan mantenimiento diariamente, quincenalmente, bimestralmente, trimestralmente o semestralmente. Usualmente, en las redes con pocas estaciones se programa un mantenimiento con mayor frecuencia, aunque los casos de operadores con tres o menos estaciones que no las mantienen más de una o dos veces al año son comunes. Las siguientes secciones explican las recomendaciones de mantenimiento no-técnico y técnico para la RAN en detalle.

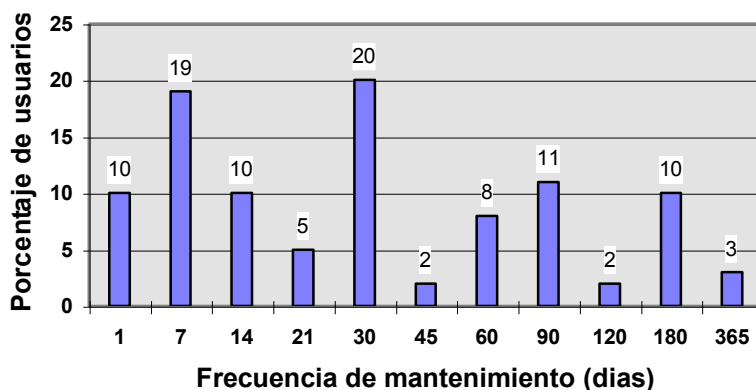


Figura A.8. Distribución discreta de la frecuencia de mantenimiento de redes de ECA.

A.4.5.1 Recomendaciones de mantenimiento no-técnico

Se recomienda revisar y limpiar bien todos los sensores y otras partes de la estación en intervalos que van desde semanas hasta cada 3 meses; el intervalo exacto depende en las condiciones locales, y puede variar con el tiempo. Por ejemplo, durante la temporada de cosecha se puede acumular más polvo en los sensores y en el panel solar que en otros tiempos. El operador debe ajustar su plan de mantenimiento de acuerdo con las condiciones actuales y esperadas para las semanas siguientes. Normalmente, cuando se instala una estación nueva, el operador debe empezar con intervalos de mantenimiento de cada dos semanas. Si se encuentra demasiado polvo en los sensores después de dos semanas, debe acortar el periodo a una semana. Por otro lado, si no se encuentra mucho polvo en los sensores cuando se da el mantenimiento a la estación, se puede alargar el intervalo hasta un mes. No se puede definir un estándar que aplique para todas las redes del país, sino que las recomendaciones anteriores.

En cada visita de mantenimiento no-técnico, se deben revisar los siguientes sensores y partes de la estación (si existen):

- Limpiar la protección de radiación y el filtro del sensor de temperatura y humedad relativa
- Nivelar y limpiar el piranómetro
- Nivelar y limpiar el orificio y la cucharilla(s) del pluviómetro
- Alinear verticalmente los sensores del viento

- Limpiar la caja del dataloger, revisar el desecante en la caja (recargar si es necesario)
- Limpiar el área del suelo arriba del sensor de temperatura del suelo (si está instalado): remover la basura y/o vegetación alta
- Revisar que los cables/alambres no estén dañados o cortados (causado por animales o vandalismo)
- Revisar que los cables expuestos a la intemperie no estén degradados por la luz UV
- Cortar el pasto/vegetación bajo y alrededor de la estación

A.4.5.2 Recomendaciones de mantenimiento técnico

Se debe de dar mantenimiento técnico preventivo con el objeto de reparar o reemplazar los sensores periódicamente para evitar fallas en los sensores. El periodo de mantenimiento técnico preventivo varía con el tipo de sensor, como se explica en la **Tabla A.6**, y consiste en un cambio de los sensores por sensores nuevos o sensores de respaldo ya calibrados y/o reparados. Este tipo de mantenimiento técnico requiere de especialistas bien capacitados. De preferencia se debe de establecer un laboratorio de calibración y reparación para toda la RAN, que cuente con un inventario de sensores calibrados por su propio personal técnico. Con este plan, se pueden minimizar fallas de sensores y el mantenimiento de emergencia resultante, con sus altos gastos.

Tabla A.6. Plan de mantenimiento técnico para las ECA de la RAN.

Sensor	Periodo de Mantenimiento Técnico
Temperatura del Aire	cada 1-2 años
Humedad Relativa	cada 6 meses - 1 año
Piranómetro	cada año
Anemómetro	cada 1 año
Veleta del viento	cada 2 años
Pluviómetro	cada 1 año
Temperatura del Suelo	cada 2 años
Cables expuestos a la intemperie	cada 5-7 años
Dataloger	cada 5-10 años

A.4.5.3 Archivos y reportes de mantenimiento de sensores

Se debe de establecer para cada estación un archivo de reportes que incluyan las fechas y el tipo de mantenimiento efectuado. Este archivo es muy importante para la validación de la calidad de los datos climatológicos recolectados de las ECA, y para establecer el plan de mantenimiento y calibración de los sensores para el futuro.

A.5 LITERATURA CONSULTADA

- American Association of State Climatologists, 1985 : Standards for instrumentation at automated stations. *The State Climatologist*, **9**(4), U.S. Dept. of Commerce, National Climatic Data Center, Asheville, N.C., 53 pp.
- Bausch, W.C., 1990 : Sensor height effect on calculated reference evapotranspiration. *Trans ASAE* **33**(3), 791-798.
- Bonhomme, R. 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*. 12:1-10.
- Brown, P.W., S.J. Owen-Joyce, C.S.T. Daughtry, y W.P. Kustas, 1990: Effect of underlying surface on ground-based environmental data collected in arid region. Poster : *ASA Annual Meet.* 21-26 Oct 1990, San Antonio.
- Crawford, K., 1991: *Mesonet Update, The Newsletter of the Oklahoma Mesonet*, University of Oklahoma.
- Desjardins, R.L., P.H. Schuepp, J.I. MacPherson y D.J. Buckley, 1992 : Spatial and temporal variations of the fluxes of carbon dioxide and sensible and latent heat over the FIFE site. *J. Geophys. Res.*, **97**(D17), 18467-18475.
- Dong, A., S.R. Gattan, J.J. Carroll, y C.R.K. Prashar, 1992 : Estimation of daytime net radiation over well-watered grass. *ASCE J. Irrig. Drain.* **118**(3), 466-479.
- Doorenbos, J., 1976 : Agro-meteorological field stations. *Irrig. Drain. Pap.* **27**, FAO, Rome.
- Finklin, A.I. y W.C. Fischer, 1990: *Weather Station Handbook - An Interagency Guide for Wildland Managers*, NFES No. 1140, National Wildfire Coordinating Group, 237 pp.
- Fritschen, L.J., 1967 : Net and solar radiation relations over irrigated fields. *Agric. Meteorol.* **4**, 55-62.
- Hollinger, S.E. y B.C. Reinke, 1990: *Illinois Climate Network*. Illinois State Water Survey, Miscellaneous Publication 122, 2 pp.
- Hubbard, K.G., N.J. Rosenberg, y D.C. Nielsen, 1983: Automated weather station network for agriculture. *J. Water Resources Management*, **109**, 213-222.
- Leclerc, M.J. y G.W. Thurtell, 1990 : Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorol.*, **52**, 247-258.
- Meyer, S.J. y K.G. Hubbard, 1992: Nonfederated automatic weather stations and networks in the United States and Canada : a preliminary survey. *Bulletin Amer. Meteorol. Soc.* **73**(4), 449-457.
- Newman, J.E., R.H. Shaw, y V.E. Suomi, 1959 : The agricultural weather station : its instruments, observations, and site requirements. Bull. 537, *Univ. of Wisconsin Agric. Exp. Stn.*, Madison.
- NWS/NOAA, 1987 : Federal standard for siting meteorological sensors at airports. FCM-S4-1987, *Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research*. U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 21 pp.
- Ojeda, W., H. Unland, O. Lemus, E. Fitz, T. Espinoza, y L. Verdugo, 1997: La red agrometeorológica nacional, *VII Congreso Nacional de Irrigación*, ANEI, Hermosillo, Sonora, 1-44 a 1-48.

- Penman, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond.* **A193**, 120-145.
- Schuepp, P.H., M.Y. Leclerc, J.I. MacPherson y R.L. Desjardins, 1990 : Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **50**, 355-373.
- Snyder, R.L., P.W. Brown, K.G. Hubbard y S.J. Meyer, 1996: A guide to automated weather stations in North America. *Advances in Bioclimatology_4*, G. Stanhill (editor), Springer Verlag, Berlin, 1-61.
- Snyder, R.L., W.O. Pruitt, D.W. Henderson y A. Dong, 1985 : California irrigation management information system final report, vol. **3**. *Land air and water resources paper* 10013C, Univ. of California, Davis.
- Tanner. B.D., 1990 : Estaciones climatológicas automatizadas. Cap. 6, Remote Sensing Reviews. Traducción de la versión original en inglés por H. Quiñones P. en 1997. *Harwood Academic Pub.* Vol. **5**(1), 73-98.
- UKMO, 1956: *Handbook of Meteorological Instruments. Part I : Instruments for Surface Observations*. United Kingdom Meteorological Office, Her Majesty's Stationary Office, 458 pp.
- WMO, 1969: Guide to meteorological instrumentation and observing practices, *World Meteorological Organization*, No. **8**, Technical Paper 3, 347 pp.
- WMO, 1983: Guide to meteorological instruments and methods of observation, *World Meteorological Organization*, No. **8**, 5th ed. Geneva, Suiza, 1.19 - 1.35.

<“El agua habla sin cesar y nunca se repite “
Octavio Paz

Anexo
Tiempo térmico y fenología de los
cultivos



B

ANEXO B

TIEMPO TERMICO Y FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS

Waldo Ojeda Bustamante y Ernesto Sifuentes Ibarra

B.1 INTRODUCCIÓN

Varios procesos biológicos como el desarrollo de las plantas y organismos se aceleran cuando la temperatura incrementa y se retrasan cuando esta disminuye. Este hecho es registrado anualmente por los agricultores cuando la duración de ciclo de los cultivos se acorta en años calientes y se alarga en año fríos. Para explicar este hecho, se usa el tiempo térmico que combina el tiempo transcurrido con la temperatura y se ha usado implícitamente por muchos años, principalmente para predecir la duración del ciclo fenológico de los cultivos. El tiempo térmico se ha expresado históricamente a través de diferentes términos: constante térmica, unidades térmicas, unidades calor, grado días desarrollo, y grado día crecimiento. El origen del concepto de los grados día se atribuye a Réaumur (1735) quien propuso comparar la suma de “grados calor” para completar el ciclo fenológico de la misma gramínea bajo climas contrastantes.

Aunque existen diversos nombres con un mismo significado, el término de unidades calor es inconveniente ya que el tiempo térmico usa a la temperatura, y no el calor, como base de cálculo. El crecimiento (cambio en tamaño) y el desarrollo (cambio de fase) de un cultivo u organismo requieren de acumular tiempo, pero ambos procesos son afectados por varios factores, principalmente ambientales como la temperatura y las horas luz. Aunque la temperatura tiene más relación con el desarrollo que con el crecimiento de un cultivo, la separación de ambos procesos (desarrollo y crecimiento) es artificial ya que ambos están conectados (Bonhomme, 2000). El crecimiento implica la aparición de nuevos tejidos (desarroll). Por ejemplo, la floración del maíz es controlada principalmente por la temperatura, sin embargo puede ser afectado también por el fotoperiodo como es el caso del cultivo de soya. En este trabajo se usará el concepto de grados día desarrollo ($^{\circ}D$), o simplemente como grados día, para expresar cuantitativamente el tiempo térmico, algunas veces llamado también tiempo fisiológico.

La fenología y el desarrollo de la mayoría de los cultivos están relacionados con el tiempo transcurrido desde la fecha de transplante o siembra el cual es finalmente una función de la cantidad de calor acumulado. Cada especie tiene un numero definido de Días Grado de Crecimiento (DGC) requeridos para alcanzar su madurez fisiológica. Se ha aplicado el concepto de DGC para la selección de variedades de cultivos en zonas agrícolas, para definir estrategias en el control de plagas y enfermedades, para

calendarización de prácticas de manejo del cultivo, para pronosticar el desarrollo fenológico de los cultivos y sobretodo para calendarizar el riego (Shayya et al., 1991a; Fox et al., 1992).

Diferentes métodos se han publicado para integrar la temperatura en función del tiempo, Wang (1960) presentó una revisión muy completa de los métodos reportados hasta esa fecha. La premisa general es que la tasa de desarrollo (D) en función (g) de la temperatura (T):

$$\frac{dD}{dt} = g(T(t)) \quad (\text{B.1})$$

Donde D es el desarrollo o edad del cultivo y T(t) es la temperatura al tiempo t. La cantidad de desarrollo o edad (ΔD) es la integral desde t=0 a t= τ .

$$\Delta D = \int_0^{\tau} g(T(t))dt, \quad g(T(t)) \geq 0 \quad (\text{B.2})$$

La ecuación anterior establece que cada especie integra los efectos de la temperatura de acuerdo a una función "g" particular para cada especie con la restricción que la tasa de desarrollo no puede ser negativa.

La importancia de la acumulación de los días grado crecimiento en la estimación del desarrollo fenológico de los cultivos radica en la generalidad de los resultados al hacer uso de ese concepto. Lo ideal de todo trabajo experimental es generar datos que puedan extrapolarse a otras condiciones bajo las cuales fueron obtenidos.

Se han desarrollado las siguientes aplicaciones prácticas a partir del concepto de grados día (Bonhomme, 2000):

- Clasificación de los cultivos a sus necesidades de tiempo térmico para completar su ciclo
- Estimación de la fecha de maduración de utilidad para definir el ultimo riego
- Pronostico de la época de cosecha para un padrón de siembras definido
- Predicción de la duración del ciclo de vida, bajo condiciones naturales, de plagas agrícolas para control biológico
- Anticipar el desarrollo de organismos dañinos con fines de control fitosanitario
- Estimar la intensidad de esporulación de hongos dañinos para los cultivos

Para un mejor manejo de los cultivos es necesario conocer las necesidades térmicas de los cultivos. Cada especie cultivada presenta diferentes respuestas a la temperatura, presentándose temperatura de interés, conocidas como temperaturas cardinales:

- i. Temperaturas letales.
- ii. Temperaturas biológicas.
- iii. Temperaturas óptimas.

Las temperaturas letales son las temperaturas máximas o mínimas ($T_{Lmáx}$ y $T_{Lmín}$) a las cuales se producen daños fisiológicos letales en la planta. Las temperaturas biológicas máximas o mínimas (T_b y T_x) definen el intervalo en donde la planta presenta actividad para desarrollar las fases fenológicas deseables (floración, fructificación y maduración).

A las temperaturas biológicas también se les conoce como temperaturas umbrales o temperaturas base. Las temperaturas óptimas (T_{op}), también expresada como un valor único en lugar de un intervalo, define el rango de las temperaturas el que el cultivo desarrolla su máximo potencial.

B.2 GRADOS DÍA DESARROLLO (oD)

El tiempo térmico expresado en la forma del concepto de Grados Día Desarrollo ($^{\circ}D$) es una medida indirecta del desarrollo de plantas y organismos y se estima como la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes de actividad biológica, T_b y T_x , las cuales definen el rango en el cual un organismo se encuentra activo. La temperatura basal T_b también se le conoce como umbral mínimo, cero vital o cero biológico. Fuera de este rango térmico el organismo no presenta un desarrollo apreciable o aún puede morir. La **Figura B.1** resume lo anterior. Las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental es menor que una temperatura basal (T_b) o mayor a una temperatura máxima. La tasa de desarrollo aumenta cuando la temperatura ambiental es mayor que la temperatura basal hasta alcanzar un valor máximo a la temperatura óptima (T_{op}). A partir de ese punto la tasa de desarrollo empieza a disminuir hasta volverse nula a una temperatura crítica o umbral máximo (T_x). Las altas temperaturas ($>T_x$) inducen el cierre de los estomas y restringe el intercambio gaseoso reduciendo la actividad fotosintética.

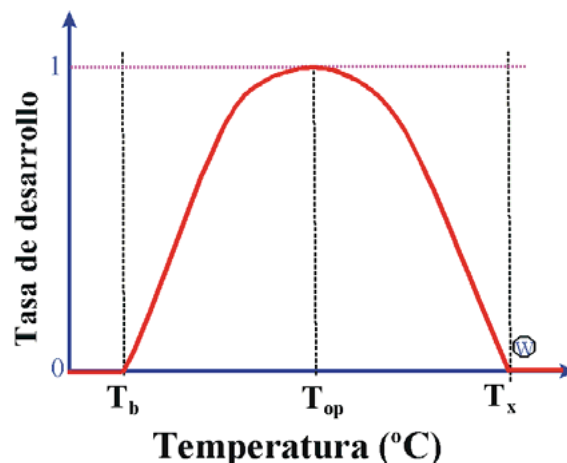


Figura B.1 Tasa de desarrollo en un organismo en función de la temperatura.

Uno de los trabajos pioneros sobre el efecto de la temperatura en el desarrollo de los cultivos se debe a Lehenbauer (1914), quien presentó datos experimentales sobre

la elongación de las hojas de maíz recién emergidas en función de la temperatura con forma similar a la mostrada en la curva de la **Figura B.1**.

Asumiendo que los cultivos presentan actividad biológica en un rango definido de temperatura, se ha definido el concepto de grado día desarrollo ($^{\circ}D$) como el periodo de 24 horas donde la temperatura del aire se encuentra un grado por arriba de la temperatura basal (T_b) y por debajo de la temperatura máxima crítica (T_x).

La **Figura B.2** se usará para explicar el concepto de día grado desarrollo. Supongamos que la temperatura de la noche es T_n y la del día T_d .

Esto es, el día se divide en dos mitades, una mitad de día y la otra de noche. El valor de $^{\circ}D$ para ese día es definido por el área del rectángulo que se forma cuando las temperaturas se encuentran por arriba de la temperatura basal (T_b), rectángulo con altura ($T_d - T_b$) y base ($0.5d$). En consecuencia para la curva de la temperatura del día mostrado en la **Figura B.2**, los días grado del día se estiman con la siguiente relación:

$$^{\circ}D = 0.5(T_d - T_b)$$

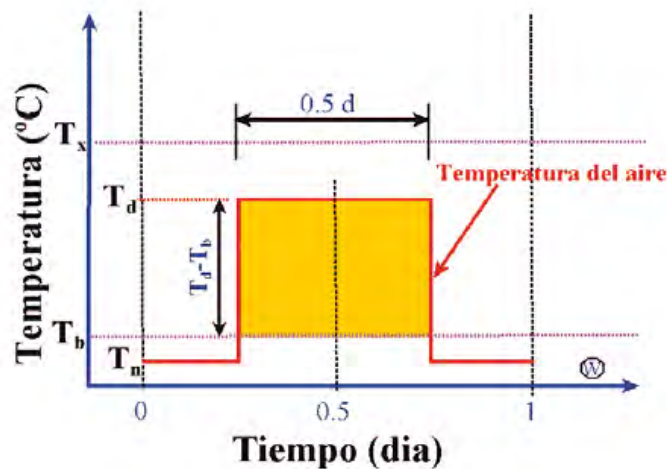


Figura B.2 Concepto de Día Grado Desarrollo asumiendo temperatura diurna constante.

Entonces, si la temperatura del día fuera uniforme (T_d) en las 24 horas. Los $^{\circ}D$ serían calculados simplemente como $T_d - T_b$, siempre y cuando $T_d > T_b > T_n$.

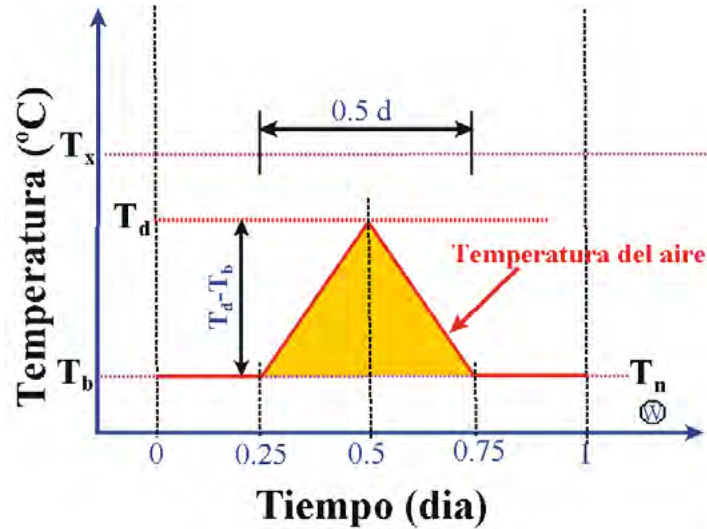


Figura B.3 Modelo triangular de la variación horaria de la temperatura.

Desafortunadamente la variación horaria de la temperatura no es constante, un modelo más realista tendría una forma triangular (**Figura B.4**). Al salir el sol, la temperatura se incrementa hasta alcanzar un máximo, para posteriormente disminuirse al ocultarse el sol. Los días grado para la variación de la temperatura de acuerdo a la **Figura B.4** se estimaría de la siguiente ecuación basada en el área de un triángulo:

$${}^{\circ}D = \frac{1}{2}(\text{base})(\text{altura}) = \frac{1}{2}(1 \text{ día})(T_d - T_b) = \frac{(T_d - T_b)}{2} =$$

El ajuste de la variación de la temperatura a lo largo de un día con modelos lineales, senoidales o polinomiales es aproximado y con gran incertidumbre si solo se dispone de dos temperaturas por día, la máxima y mínima. Tal como se muestra en la **Figura B.4** para ajustar un triángulo a la curva de la temperatura horaria. Con el abaratamiento de estaciones meteorológicas automatizadas es posible tener una gran cantidad de puntos a lo largo del día que permite tener una mayor precisión en la estimación de los días grado desarrollo.

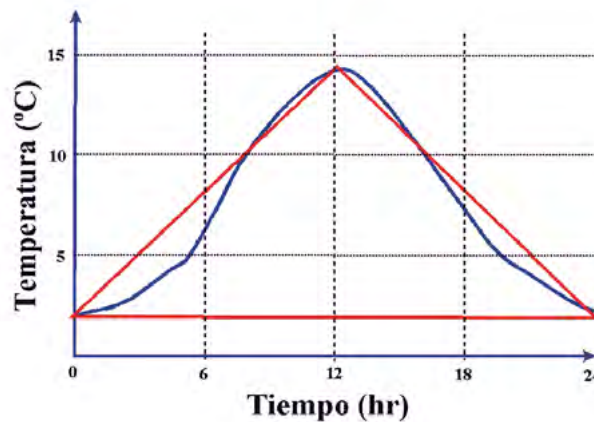


Figura B.4 Ajuste de un modelo triangular a la variación de la temperatura horaria de un día.

Se ha comprobado experimentalmente que los cultivos requieren de diferentes valores acumulados de días grado desarrollo ($\Sigma^{\circ}D$) a partir de la emergencia o trasplante. Los valores acumulados para n días transcurridos se expresa con la siguiente relación:

$$\Sigma^{\circ}D = \sum_{i=1}^n {}^{\circ}D_i$$

Donde i es el día transcurrido a partir de emergencia o siembra ($i=1$) hasta senescencia ($i=n$).

Es necesario comentar que los valores de los días grado dependen de la escala usada. Un día grado centígrado ($^{\circ}D_c$) es diferente de un día grado Fahrenheit ($^{\circ}D_f$), por lo que se debe de tener cuidado en la escala que se usa. Se requieren 9 $^{\circ}D_f$ para generar 5 $^{\circ}D_c$. Por lo tanto 1 $^{\circ}D_c = 9/5$ $^{\circ}D_f$. En este documento solo se usaran días grado centígrado, por lo que $^{\circ}D_c = ^{\circ}D$.

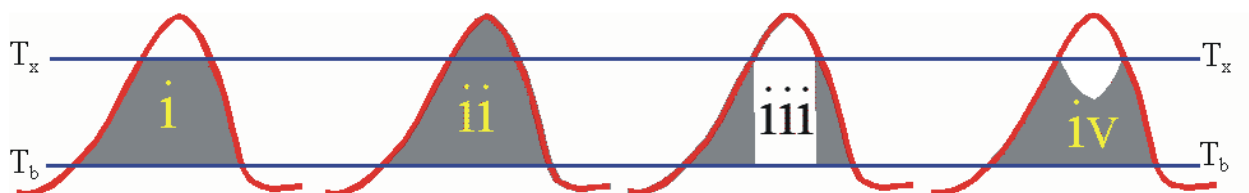


Figura B.5 Caso de corte superior para el cálculo de los grados día.

Las altas temperaturas tienen un impacto severo en los organismos. Se han propuesto cuatro variantes de los métodos para el cálculo de los grados día ($^{\circ}D$) dependiendo de la forma en que se consideran la integración de las temperaturas mayores a la temperatura T_x :

- i. Corte horizontal.* Las temperaturas mayores a T_x se igualan a T_x , esto es, se consideran como $T=T_x$ (ver caso i de la **Figura B.5**).
- ii. Sin corte.* No existe una temperatura de corte (T_x) para la estimación en el cálculo de los $^{\circ}D$ (ver caso ii de la **Figura B.5**).
- iii. Corte vertical.* Las temperaturas mayores a T_x no se consideran en los cálculos (ver caso iii de la **Figura B.5**).
- iv. Corte intermedio.* Se recalcula la temperatura como $T=2T_x-T$ si $T>T_x$ y $T=T_b$ si $T<T_b$ (ver caso iv de la **Figura B.5**).

Actualmente el caso i es el más usado en la práctica, aunque el caso ii también ha sido usado al no considerar la temperatura crítica T_x ya que existen varios estudios basado en este caso. Los modelos iii y iv han sido usados principalmente en estudios sobre desarrollo de insectos.

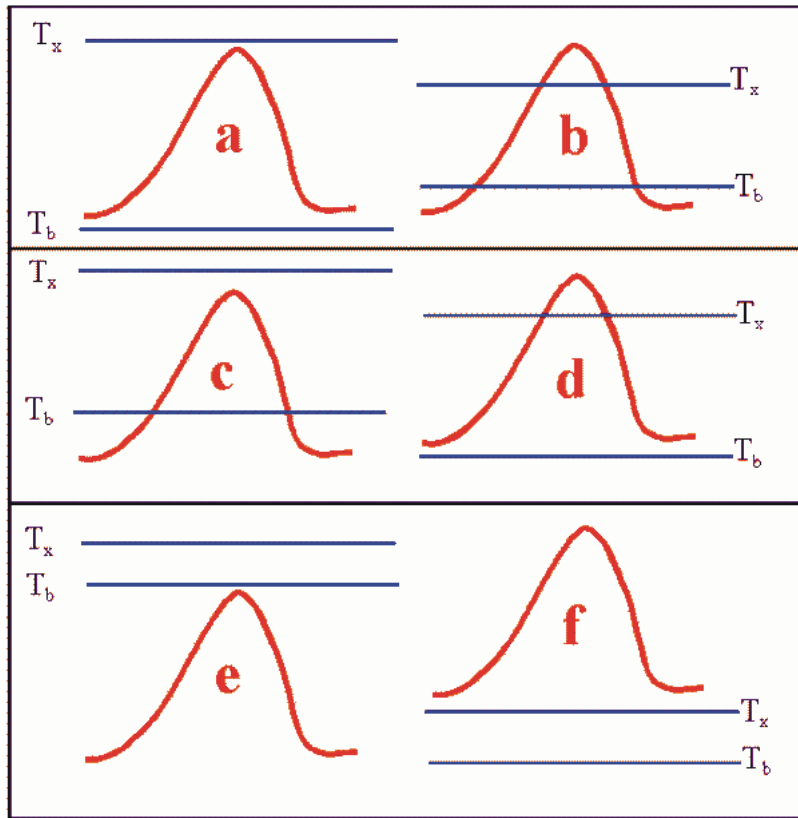


Figura B.6 Casos de localización de la curva de la temperatura con respecto a las temperaturas biológicas (T_b y T_x) para el cálculo de los °D.

Para el cálculo de los °D, se pueden presentar seis casos en relación a la ubicación de la curva de temperatura con respecto a las temperaturas de corte que definen la actividad biológica de los cultivos u organismos (T_b y T_x) tal como se presenta en la **Figura B.6**. Se observa que la curva puede quedar totalmente entre el intervalo de dichas temperaturas (caso a de la **Figura B.6**). Parte de curva esta fuera del intervalo de actividad biológica (caso b). Solo una temperatura corta la curva, caso c para T_b y caso d para T_x . La curva puede estar por arriba (caso e) o por abajo del intervalo de actividad biológica (caso f). Para el cálculo de los °D, se pueden presentar seis casos en relación a la ubicación de la curva de temperatura con respecto a las temperaturas de corte que definen la actividad biológica de los cultivos u organismos (T_b y T_x) tal como se presenta en la **Figura B.6**. Se observa que la curva puede quedar totalmente entre el intervalo de dichas temperaturas (caso a de la **Figura B.6**). Parte de curva esta fuera del intervalo de actividad biológica (caso b). Solo una temperatura corta la curva, caso c para T_b y caso d para T_x . La curva puede estar por arriba (caso e) o por abajo del intervalo de actividad biológica (caso f).

A continuación se presentan los métodos más usados para el cálculo de los grados día. El mejor método depende del tipo de datos disponible, del cultivo u organismo de interés, y de la información experimental disponible. Esto es, se pueden tener los mejores sensores para estimar la temperatura a intervalos menores de una

hora, sin embargo la mayoría de los estudios han usado dos datos diarios de temperaturas: máxima y mínima. Como fue comentado por Bonhomme (2000), aumentando complejidad del método de cálculo a menudo resulta en pequeñas mejoras en los resultados. En consecuencia es recomendable realizar cálculos simples sin olvidarse de la no linealidad entre la temperatura y la tasa de desarrollo de los cultivos.

Al usar datos experimentales de $\Sigma^{\circ}D$, es necesario conocer cuáles fueron las temperaturas umbrales usadas y el método de cálculo usado. Los métodos más usados para el cálculo de $^{\circ}D$ son:

i. Método del promedio diario

Tradicionalmente solo se tenía acceso a estaciones meteorológicas convencionales que registraban solamente las dos temperaturas diarias extremas, la mínima y la máxima, por lo que el método más usado consiste en obtener el promedio diario a partir de dichas temperaturas.

$$(\bar{T} = ((T_{max} + T_{min}))/2)$$

Uno de los métodos más antiguos para calcular los días grado se puede estimar con la siguientes ecuaciones que corresponde al caso ii de la **Figura B.5**.

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= \bar{T} - T_b, \bar{T} > T_b \\ ^{\circ}D &= 0, \bar{T} \leq T_b \end{aligned}$$

En el cálculo de los días grado usualmente se pone una restricción para obtener valores positivos (corresponde al caso i de la **Figura B.5**), el promedio diario se iguala a T_b si $T < T_b$, y se iguala a T_x si $T > T_x$. Lo anterior indica que el proceso de desarrollo se retrasa en días fríos pero no se anula. De esta manera el modelo general para calcular los días grado desarrollo ($^{\circ}D$) está dado por:

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= \bar{T} - T_b, \bar{T} < T_x \\ ^{\circ}D &= T_x - T_b, \bar{T} \geq T_x \\ ^{\circ}D &= 0, \bar{T} \leq T_b \end{aligned}$$

Ejemplo. Si las temperaturas biológicas del maíz son $T_b=10^{\circ}C$ y $T_x=30^{\circ}C$ y si las temperaturas máxima y mínima del día son $18^{\circ}C$ y $8^{\circ}C$, el promedio del día es de $13^{\circ}C$, y por lo tanto los grados días son: $13^{\circ}C - 10^{\circ}C = 3^{\circ}DD$.

Si el promedio del día es de $8^{\circ}C < T_b$, los grados días son cero.

En cambio, si el promedio del día es mayor que $T_x=30^{\circ}C$, los grados días se calculan como la diferencia de las temperaturas umbrales. $30^{\circ}C - 10^{\circ}C = 20^{\circ}DD$.

ii. Método de curvas de ajuste

Por muchos años se realizaron grandes esfuerzos para predecir el comportamiento de la curva de la temperatura horaria basada en las únicas temperaturas usualmente disponibles: mínima y máxima del día.

Una vez que se obtienen los parámetros de la curva ajuste se calculan los días grado ($^{\circ}\text{D}$) por medio de ecuaciones algebraicas obtenidas de acuerdo a las reglas de integración matemática. Uno de los métodos más usados para estimar los $^{\circ}\text{D}$ es conocido como el método del seno simple. El método ajusta una curva senoidal para cada día (24 hrs), usando como parámetros las temperaturas máxima y mínima del día (**Figura B.7**) El área bajo la curva de ajuste por encima de la temperatura basal define el valor de los $^{\circ}\text{D}$ para cada día.

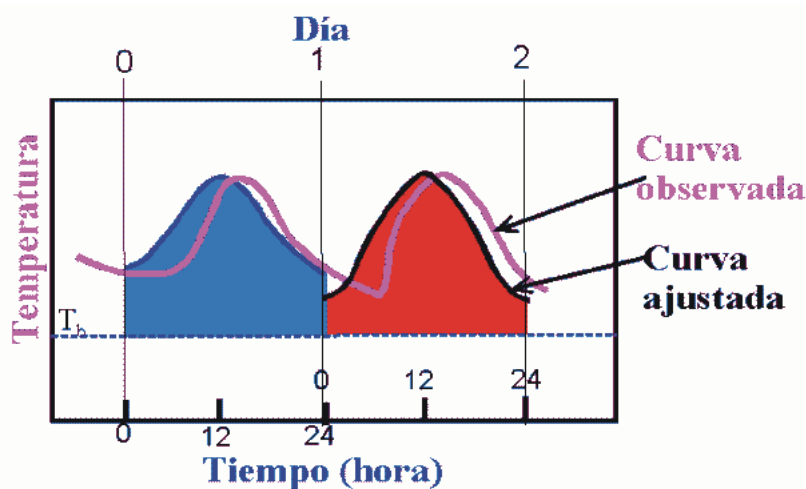


Figura B.7 Curvas de ajuste a la curva diaria observada para estimar $^{\circ}\text{D}$.

iii. Método de la integración numérica de la curva observada

El método de la integración se basa en las técnicas de integración numérica que aproxima el área bajo la curva de la temperatura observada por medio de una serie de rectángulos. Por ejemplo, se puede dividir un día en 24 rectángulos, uno para cada hora. De esta forma se genera el concepto de horas grado ($^{\circ}\text{H}$), que se define como una unidad de tiempo de una hora donde la temperatura del aire se encuentra un grado por arriba de la temperatura basal.

De acuerdo a la **Figura B.8**, en el periodo de 11-12 hr se acumularon 12 $^{\circ}\text{H}$ que se obtiene al restar la temperatura media horaria de la temperatura basal (14-2), mientras que en el periodo de 17-18 hr se acumularon 6.2 $^{\circ}\text{H}$.

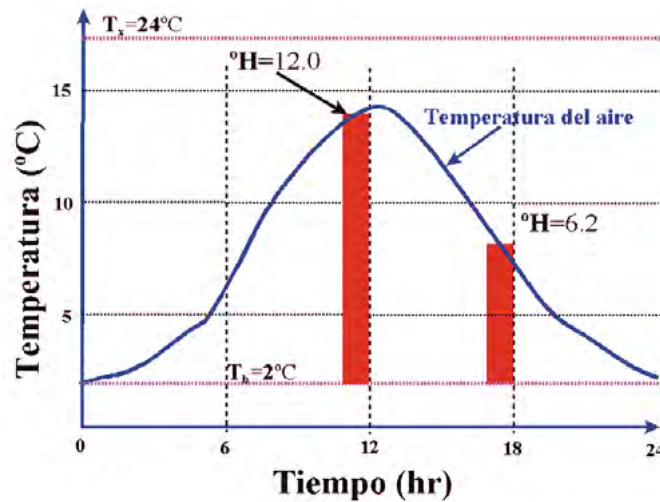


Figura B.8 Concepto de horas grado desarrollo ($^{\circ}\text{H}$).

Para convertir de $^{\circ}\text{H}$ a $^{\circ}\text{D}$ se usa la siguiente equivalencia, $1^{\circ}\text{D} = (\sum ^{\circ}\text{H})/24$. El concepto de hora grado es más potente, sin embargo la mayor parte de la información publicada se ha estimado en base a los días grado desarrollado usando solamente las temperaturas máxima y mínima del día.

La tasa de desarrollo se relaciona directamente con las temperaturas: basal y óptima. Por debajo de la temperatura basal en el cultivo no se desarrolla y por arriba de la óptima la tasa de desarrollo empieza a disminuir (Summerfield et al., 1991; Krause et al., 2005). Diversas variantes han sido reportadas para estimar el tiempo térmico. A pesar de los desarrollos tecnológicos para monitorear en tiempo “casi real” las variables meteorológicas, la mayoría de los métodos de estimación de tiempo térmico han sido desarrollados para valores promedios diarios (Villordon et al., 2009). El método estándar basado en la temperatura promedio es el método más utilizado para estimar los $^{\circ}\text{D}$ (Dufault, 1997). Sin embargo se han reportado en la literatura métodos que utilizan más parámetros como (Sands et al., 1979) que reporta el método P-Days.

B.3 FENOLOGÍA

Una de las aplicaciones más usada del concepto de días grado en la predicción de la fenología de los cultivos. Un cultivo cambia de etapa fenológica cuando el tiempo térmico alcanza su valor requerido para dicha etapa. Diversos modelos, principalmente lineales, han sido ampliamente utilizados para predecir los cambios en la fenología de los cultivos en función del tiempo térmico (Lallukka et al., 1978). Otros trabajos realizados en la comparación de métodos para estimar la fenología basado en $^{\circ}\text{D}$ ha sido reportada por (Villordon et al., 2009). Para el caso del Maíz, Ojeda et al (2006) reportó el tiempo requerido por etapa fenológica para variedades de ciclo intermedio más usadas en el norte de Sinaloa, México (**Tabla B.1**).

Tabla B.1 Grados Día (°D) requeridos por etapa para maíz de ciclo intermedio en el norte de Sinaloa, México.

Etapa	Clave	Duración etapa		Duración acumulada	
		Días <i>n</i>	$\Sigma^{\circ}D$	<i>Días n</i>	$\Sigma^{\circ}D$
Emergencia	Ve	12	109.4	12	109.4
4-hojas	V4	34	207.0	46	316.4
8-hojas	V8	37	185.5	83	502.0
12-hojas	V10	14	74.1	97	576.1
Flor masculina	VT	13	89.1	110	665.2
Jiloteo	R1	15	158.3	125	823.5
Grano acuoso	R2	17	155.1	142	978.6
Grano lechoso	R3	11	123.7	153	1102.3
Grano masoso	R4	11	137.5	164	1239.8
Grano abollado	R5	7	95.8	171	1335.5
Madurez	R6	8	115.6	179	1451.1
Cosecha	-	11	189.6	190	1640.8

Se ha presentado las bases teóricas del concepto de días grado para estimar la aparición de las etapas fenológicas de los cultivos. Como la fenología está asociada al manejo del cultivo como el riego, se han propuesto diversos modelos para estimar el coeficiente de cultivo en función de los grados día acumulado (Ojeda *et. al.*, 2006). Es necesario notar que es algunos cultivos como el trigo de invierno, que requieren de un proceso de vernalización, es necesario realizar un ajuste del tiempo térmico para considerar el proceso de vernalización que ocurre en dichos cultivos.

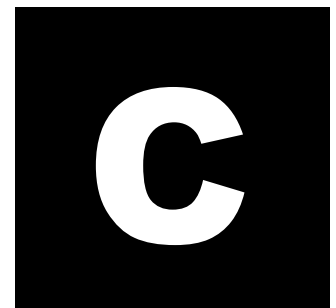
B.4 LITERATURA CONSULTADA

- Bonhomme, R. 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*. 12:1-10.
- Brown, D. M. 1975. Heat Units for corn in Southern Ontario. Ontario Ministry of Agriculture and Food. *Agdex Factsheet*. 111/31.
- Dufault, R.J. 1997. Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. *J. Amer. Soc. Hort. Scr.* 122: 169-174
- Fox, F.A., T. Scherer, D. Slack y L. J. Clark. 1992. *Arizona Irrigation Scheduling (AZSCHEd software). Users Manual. Version 1.01.* The University of Arizona. 36 pp.
- Krause P, Boyle DP, Base, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5: 89–97.
- Lallukka, L.J., Rantanen, O., Mukula, J., 1978. The temperature sum requirement of barley varieties in Finland. *Ann. Agric. Fenn.*, 17: 185-191.
- Lehenbauer, P. A. 1914. Growth of maize seedling in relation to temperature. *Physiol. Res.* 1:247-288.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia* 40:13-25.
- Sands, P.J., Hackett, C. and Nix, H.A. 1979. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Field Crops Res* 2:309-331.
- Shayya, W.H., V.F. Bralts, and T.R. Olmsted. 1991b. Irrigation scheduling based on growing degree days. *ASAE Paper No. 91 2643.* Amer. Soc. of Agric. Eng. St. Joseph, Mich., USA.
- Summerfield, R.J., Roberts, E.H., Ellis, R.H., Lawn, R.J., 1991. Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Exp. Agric.*, 27: 11-31.
- Villordon, A.; Clark, C.; Ferrin, D. y D. LaBonte. 2009. Using Growing Degree Days, Agrometeorological Variables, Linear Regression, and Data Mining Methods to Help Improve Prediction of Sweetpotato Harvest Date in Louisiana. *Hortechology* 19: 133-144.

Figura B.1 Tasa de desarrollo en un organismo en función de la temperatura. B-5
Figura B.2 Concepto de Día Grado Desarrollo asumiendo temperatura diurna constante..... B-6
Figura B.3 Modelo triangular de la variación horaria de la temperatura. B-7
Figura B.4 Ajuste de un modelo triangular a la variación de la temperatura horaria de un día. B-7
Figura B.5 Caso de corte superior para el cálculo de los grados día. B-8
Figura B.6 Casos de localización de la curva de la temperatura con respecto a las temperaturas biológicas (T_b y T_x) para el cálculo de los oD. B-9
Figura B.7 Curvas de ajuste a la curva diaria observada para estimar $^{\circ}D$ B-11
Figura B.8 Concepto de horas grado desarrollo ($^{\circ}H$)..... B-12

Tabla B.1 Grados Día ($^{\circ}D$) requeridos por etapa para maíz de ciclo intermedio en el norte de Sinaloa, México. B-13

Anexo
Calendarización del riego usando el
concepto de tiempo térmico



ANEXO C

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO USANDO EL CONCEPTO DE TIEMPO TÉRMICO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

C.1 INTRODUCCIÓN

Para optimizar los recursos hídricos de una área de riego, es de vital importancia conocer los requerimientos hídricos de los cultivos a lo largo de sus diferentes fases fenológica, para poder suministrar el riego de una manera calendarizada que permita al suelo reponer continuamente el agua perdida, tanto por la transpiración del cultivo como por la evaporación del suelo. El objetivo principal del riego es aplicarlo en la zona de raíces a la tasa que es demandada por los cultivos.

La calendarización del riego se ha definido como el procedimiento para determinar la cantidad y tiempo de aplicación del riego a un cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico, para suministrar no sólo los requerimientos hídricos de los cultivos sino para mantener al cultivo con un ambiente favorable de desarrollo, para lo cual se pueden necesitar cantidades adicionales de agua para control de sales, heladas, plagas y enfermedades. Para calendarizar el riego de manera científica se requiere conocer las tres variables dinámicas de calendarización a lo largo del ciclo fenológico de los cultivos: coeficiente de cultivo (K_c), la profundidad radical (P_r) y el factor de abatimiento hídrico (f).

En el anexo B se presentó la importancia de la acumulación del tiempo térmico en la estimación del desarrollo fenológico de los cultivos. En este anexo se presenta una metodología para aplicar el concepto de tiempo térmico a través de estimar los días grado ($^{\circ}D$) acumulados. El concepto de tiempo térmico es muy potente para aplicar resultados experimentales a otras condiciones climáticas bajo los cuales fueron obtenidos.

El término días grado acumulados ($\sum^{\circ}D$) permite definir la duración del ciclo fisiológico relativo a las condiciones acumuladas de la temperatura ambiental a partir de la fechas de siembra, emergencia o de trasplante. En este enfoque cualquier variable relacionada con el desarrollo fenológico, como el coeficiente de cultivo (K_c), la profundidad radical (P_r) y el factor de abatimiento hídrico (f), es expresada en función de los $\sum^{\circ}D$ y no sobre la base de unidades de tiempo civiles como días después de siembra o emergencia.

Bajo este enfoque los coeficientes o parámetros se ajustan automáticamente a las condiciones meteorológicas imperantes en el sitio bajo estudio, de esta manera se

obtienen curvas normalizadas de los coeficientes basados en DGC. Por ejemplo, los valores de K_c son de uso limitado cuando se definen en función de los días después de la siembra o emergencia o alguna otra unidad de tiempo. Su uso se restringe a localidades con clima similar al del sitio donde las curvas fueron obtenidas, ya que no toma en cuenta los efectos de la variabilidad climática temporal en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Uno de los retos actuales de la agricultura es generar herramientas que permitan practicar una agricultura climáticamente inteligente ante la intensificación del cambio climático. Ante tal situación cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos, principalmente el riego y nutrición, haciéndose necesario tecnologías y metodologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos (Ojeda et al., 2008). Con el desarrollo de las comunicaciones (Internet) y la informática, actualmente es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos apoyados en el concepto de tiempo térmico para riego, plagas, enfermedades y otros. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda et al., 2006).

C.2 ECUACIONES PARA LA CALENDARIZACION INTEGRAL DEL RIEGO

El concepto de días grado crecimiento resultó de observaciones que indicaban: i) que las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental era menor que una temperatura basal (Neild y Smith, 1997), ii) que la tasa de desarrollo aumentaba cuando la temperatura ambiental era mayor que la temperatura basal, y iii) que las variedades de maíz requieren diferentes valores acumulados ($\Sigma^{\circ}D$) de los días grado crecimiento ($^{\circ}D$). Para mayor información del concepto de días grado revisar el anexo B.

Usando valores de evapotranspiración real (ET_c) medidos con lisímetros y de la evapotranspiración de referencia (ET_o) estimados con la ecuación del Penman, Sammis et. al. (1985) desarrollaron los coeficientes de cultivo basados en DGC para varios cultivos, sus resultados mostraron diferencias no significativas en las curvas obtenidas para K_c entre diferentes localidades de Nuevo México, EE. UU. Encontraron que las curvas basadas en DGC tenían menor variabilidad que las basadas en días julianos para maíz y sorgo. Para el caso de algodón la diferencia entre ambas curvas no fue significativa. Diferentes estudios han demostrado que es posible generar experimentalmente curvas de K_c basadas en DGC y aplicarlas en otras localidades con características climáticas contrastantes.

El concepto de grados día ha sido muy útil en el pronóstico del desarrollo fenológico de los cultivos, por lo que ha sido utilizado para estimar el coeficiente de cultivo (Sammis, et al., 1985; Stegman, 1988; y Slack, et al., 1996). Fox, et al. (1992) propusieron una serie senoidal para estimar el coeficiente de cultivo que tiene la inconveniencia de generar valores negativos o cercanos a cero en la primera fase fenológica del cultivo, subestimando los valores reales. Con el propósito de evitar estas

discrepancias Ojeda et. al. (2004, 2006) introdujeron el siguiente modelo para estimar el coeficiente de cultivo (K_c):

$$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2 \quad (\text{C.1})$$

Si $K_c < K_1$, entonces $K_c = K_1$

Donde

K_1 es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica que depende principalmente de la evaporación del suelo

K_{\max} es el máximo valor de K_c durante el ciclo del cultivo

$x_{K_{\max}}$ es el valor de los días grado crecimiento acumulado donde se presenta en valor de K_{\max}

α_1 es el parámetro de regresión obtenido por ajuste de datos experimentales al modelo

Erfc es la función error complementario

Para facilitar la expresión matemática del desarrollo de un cultivo se utiliza una variable auxiliar x que expresa los días grado crecimiento acumulado ($\Sigma^\circ D$) normalizado con respecto al total de $^\circ D$ requeridos para terminar su ciclo fenológico normal, expresado por la constante α_o , a partir de la siembra o emergencia del cultivo.

$$x = \frac{\Sigma^\circ D}{\alpha_o} \quad (\text{C.2})$$

Donde α_o representa los días grado requeridos para alcanzar la muerte fenológica del cultivo.

La ventaja del modelo propuesto para estimar el coeficiente de cultivo (ecuación C.1) radica en que considera un valor constante de K_c para la primera etapa fenológica en función de los días grado acumulados (K_1).

El siguiente modelo propuesto también por Ojeda et. al. (2004) permite estimar la profundidad radical (P_r):

$$P_r = P_{ro} + (P_{r_{\max}} - P_{ro}) \left(1 - e^{-\left(\frac{\Sigma^\circ D}{\alpha_2}\right)^2}\right) \quad (\text{C.3})$$

Donde:

P_{ro} profundidad inicial de mojado para germinación óptima (relacionada con la profundidad de siembra)

P_{max} profundidad radical máxima

e base de los logaritmos naturales

β Parámetro de regresión, obtenido al ajustar datos experimentales, que es aproximadamente igual:

$$\alpha_2 \cong \frac{2}{3} \Sigma D_r$$

Donde ΣD_r es el valor en días grado acumulado ($\Sigma^{\circ}D$) donde se alcanza la máxima profundidad radical.

El modelo propuesto para estimar la profundidad radical (ecuación C.3) ofrece la versatilidad de reajustarse al cambiar el parámetro de profundidad radical máxima y/o inicial.

El tercer modelo lineal, propuesto por Ojeda et. al. (2004), estima el factor de abatimiento hídrico (f) a partir del coeficiente de cultivo (K_c) con la siguiente relación:

$$f = \alpha_3 - \alpha_4 K_c \quad (C.4)$$

Donde α_3 es la interceptada al origen y α_4 la pendiente de la recta.

El modelo para estimar el factor de abatimiento (ecuación C.4) está relacionado en forma inversa con el coeficiente de cultivo, dado por la pendiente negativa de la recta. Lo anterior está relacionado con el hecho que cuando mayor son los requerimientos hídricos de los cultivos, estos son más sensibles al estrés de humedad y por ende cuando K_c incrementa el factor f disminuye. El manejo del riego está relacionado con el factor f . El riego por goteo presenta valores menores de f que para el riego por aspersión y este último tiene valores menores que aquellos para riego por gravedad.

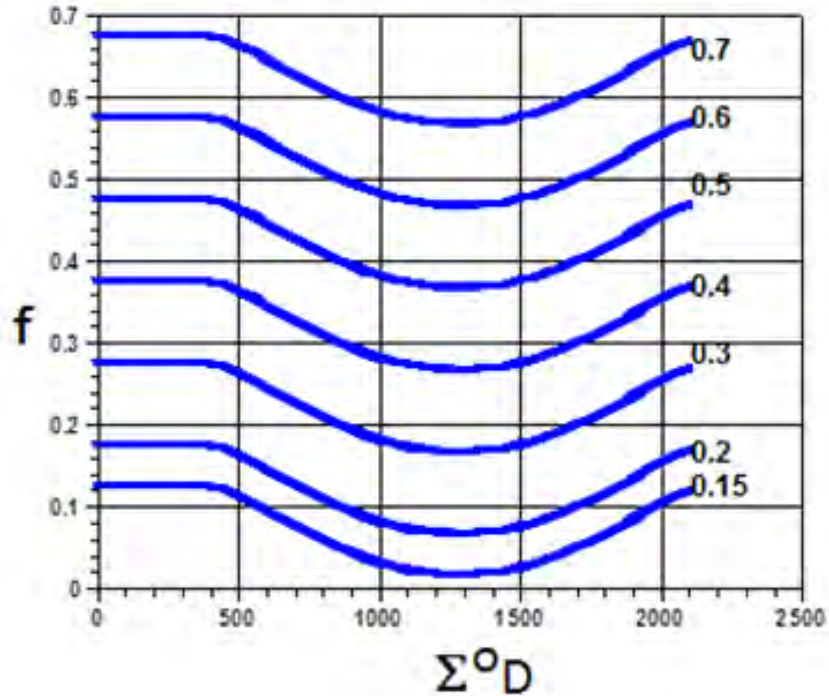


Figura C.1 Variación del factor de abatimiento (f) en función del parámetro α_3 definido por el sistema de riego.

En la **Tabla C.1** se presentan un resumen de las ecuaciones para estimar las variables del calendarización de riegos propuestos por Ojeda-Bustamante et al., 2004. En adición al parámetro común α_0 de la Ecuación C.2, se requieren cuatro parámetros adicionales para estimar el coeficiente de cultivo, tres para la profundidad radical y dos para el factor de abatimiento hídrico.

Tabla C.1 Descripción de los modelos con parámetros para expresar las variables de calendarización del riego

Variable	Modelo	Parámetros
Coeficiente de cultivo	$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2$ <p>Si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$</p>	$K_{\max}, x_{K_{\max}}, \alpha_1$ K_{co}
Profundidad radical	$R_d = R_{do} + (R_{d_{\max}} - R_{do}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{(\Sigma^\circ D)^2}{\alpha_2^2}\right) \right\}$	$R_{do}, R_{d_{\max}}, \alpha_2$
Factor de abatimiento	$f = \alpha_3 - \alpha_4 K_c$	α_3, α_4

Los parámetros α_1 , α_2 , α_3 , y α_4 se obtienen del ajuste entre los datos experimentales y los modelos de la **Tabla C.1**. K_{max} es valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c) y $x_{K_{max}}$ es el valor normalizado de x donde se presenta el valor máximo K_{max} . K_{co} es el valor inicial de K_c cuando el área foliar del cultivo es mínima, predominando la evaporación del suelo sobre la transpiración del cultivo. R_{do} es la profundidad de siembra (L) y R_{dmax} es la profundidad máxima efectiva de las raíces (L).

Tabla C.2 Parámetros de calendarización del riego para papa
(Ojeda-Bustamante et al., 2004).

Parámetro	K_{max}	K_{co}	$x_{K_{max}}$	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
Valor	1.3	0.20	0.6	2100	0.45	600	0.68 (gravedad) 0.45 (Aspersión pivote)	0.1

Como muestra se presentan la forma de las variables de calendarización de riego (Pr , F y K_c) para el cultivo de papa de acuerdo a los parámetros presentados en la **Tabla C.2**.

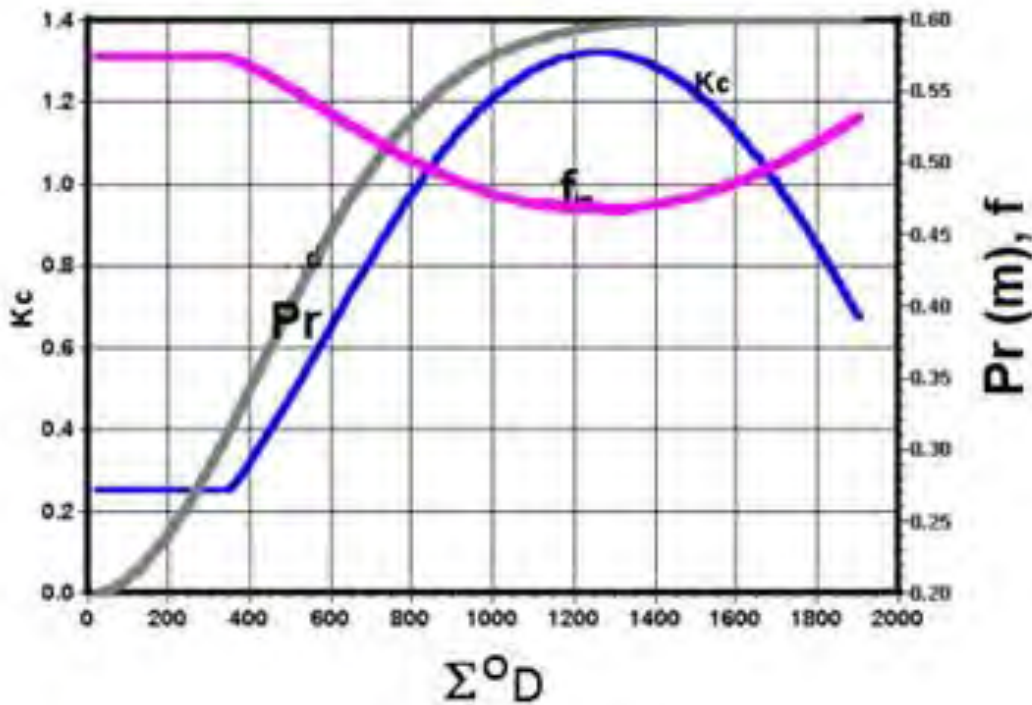


Figura C.2 Curvas generadas por las ecuaciones del **Tabla C.1** para el cultivo de papa (Ojeda-Bustamante et al., 2004)

C.3 EJEMPLO DE APLICACION PARA MAÍZ

En esta sección se presenta un caso de aplicación para el cultivo del maíz siguiendo los resultados presentados por (Ojeda-Bustamante et al., 2004). Lo primero que se tiene que definir al usar la metodología de los días grado es el método para estimarlos. Se usaran las siguientes ecuaciones para estimar los °D de acuerdo al trabajo de (Ojeda-Bustamante et al., 2004):

$$\begin{aligned} \text{°D} &= T_a - T_b, T_a < T_x \\ \text{°D} &= T_x - T_b, T_a \geq T_x \\ \text{°D} &= 0, T_a \leq T_b \end{aligned} \tag{C.5}$$

Donde T_a es la temperatura media ambiental diaria, T_b y T_x son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual el cultivo se desarrolla. La temperatura media diaria (T_a) es el promedio aritmético de las mediciones de la temperatura ambiental realizadas en el transcurso del día, siendo el caso más simple el promedio de la temperatura máxima y mínima del día.

Aunque el maíz puede sobrevivir temperaturas adversas en el rango de 0 a 45°C, las temperaturas de desarrollo del maíz, usualmente usadas para estimar los °D, son 10 °C y 30 °C, para T_b y T_x , respectivamente. Temperaturas mayores a 32 °C producen reducciones significativas en el rendimiento, principalmente durante las fases de llenado de grano y reproducción (Neild y Newman, 1987).

La acumulación diaria de los °D es una variable de gran valor predictivo durante el manejo del riego. La maduración de las variedades comerciales del maíz varía para valores acumulados de 1150 a 1760 °D. Las variedades se pueden clasificar por los requerimientos de °D, las ciclo corto tienen un rango de 1150-1315 °D, las de ciclo intermedio de 1315-1590 °D y las de ciclo largo de 1590-1760 °D (Neild y Newman, 1987).

Los correspondientes parámetros de los modelos (**Tabla C.1**) obtenidos por Ojeda-Bustamante et al. (2006) usados para calendarizar el riego en maíz se presentan la **Tabla C.3**. El parámetro α_3 se asocia al sistema de riego, que para riego por gravedad fue de 0.6 y para aspersión de 0,6.

Tabla C.3 Parámetros de calendarización del riego obtenidos para el cultivo de maíz bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua

Parámetro	Valor
K_{max}	1.25
K_{co}	0.2
$X_{K_{max}}$	0.59
R_{do}	0.07 m

Parámetro	Valor
R_{dmax}	1.00 m
$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$	1641, 0.45, 527,
α_3	0.8 (Gravedad), 0.6(aspersión)
α_4	0.1

Para mostrar la aplicabilidad de los modelos usados, Ojeda-Bustamante et al. (2006) generaron y aplicaron calendarios de riego a dos parcelas comerciales del Valle del Fuerte, Sinaloa. Se usaron los parámetros de la **Tabla C.3** para generar calendarios de riego en surcos y aspersión móvil para maíz. En ambos calendarios se considera que el primer riego se aplica para mojar la zona de raíces asumiendo el suelo a una humedad inicial muy baja. El calendario de riego bajo riego por gravedad se presenta en la **Tabla C.4** con un riego de presembrado de 23.5 cm. Se aplicaron cuatro riegos de auxilio además del riego de presembrado, totalizando una lámina neta de 44.2 cm y una lámina bruta de 73.7 cm, con una eficiencia de aplicación del 60%.

Tabla C.4 Calendario de riego en maíz bajo riego por gravedad

Riego (Número)	Intervalo (días)	Días después de siembra (días)	$^{\circ}D$ acumulados partir de siembra ($\Sigma^{\circ}D$)	Lamina neta (mm)	Lamina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.00	235.00
2	84	64	424.72	44.50	74.16
3	34	98	580.13	73.70	122.83
4	23	121	778.48	86.05	143.42
5	30	141	980.00	96.90	161.50
Total				44.22	736.91

El calendario de riego bajo riego por aspersión móvil se presenta en el **Tabla C.4** con un riego de presembrado de 16.6 cm. Se aplicaron 8 riegos de auxilio además el riego de presembrado, para totalizar una lámina neta de 52 cm y una lámina bruta de 61 cm, con una eficiencia de aplicación del 85%.

Tabla C.5 Calendario de riego en maíz bajo por aspersión móvil (avance frontal)

Riego (Número)	Intervalo (días)	Días después de siembra (días)	$^{\circ}D$ acumulados partir de siembra ($\Sigma^{\circ}D$)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.00	165.05
2	50	30	225.5	15.59	18.34
3	38	68	442.8	36.35	42.76
4	20	88	527.5	42.85	50.41
5	19	107	635.4	49.76	58.54
6	13	120	766.1	52.63	61.94
7	12	132	890.2	56.87	66.91
8	13	145	1011.9	61.11	71.89
total				456.16	535.84

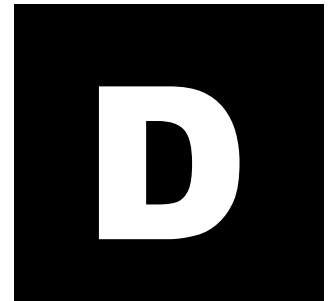
C.4 LITERATURA CONSULTADA

- Fox, F.A., T. Scherer, D. Slack y L. J. Clark. 1992. Arizona Irrigation Scheduling (AZSCHED software). Users Manual. Version 1.01. The University of Arizona. 36 pp.
- Neild R. E. y J. E. Newman. 1987. Growing Season Characteristics and Requirements in the corn belt. In. National Corn Handbook. Project leader R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA.
- Neild, R. E. y D. T. Smith. 1997. Maturity dates and freeze risks based on growing degree days. University of Nebraska. Paper G83-673-A
- Ojeda, W., Martínez, P. y Hernández, L. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6 del libro "Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México". Vol. II. Eds. A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, D. C. Slack, and M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53:251-261.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland. 2006. Programación integral del riego en maíz. *Agrociencia* 40:13-25.
- Sammis T.W., C.L. Mapel, D.G. Lugg, R.R. Lansford, and J. T. McGuckin. 1985. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. *Transactions of the ASAE*. 28:773-780.
- Slack DC, Martin EC, Sheta AE, FoxF Jr, Clark LJ, Ashley RO. 1996. Crop coefficients normalized for climatevariability with growing-degreedays. In *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. American Society of Agricultural Engineers; 892–898.
- Stegman EC. 1988. Corn crop curve comparisons for the central and northern great plains of the US. *American Society of Agricultural Engineering* 4(3): 226–233.

“En muchos países el riego es un arte antiguo, tanto como la civilización, pero para la humanidad es una ciencia, la de sobrevivir”

O.W. Israelsen

Anexo
Ejemplo del cálculo de los
requerimientos de riego usando
CROPWAT



ANEXO D.

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO USANDO CROPWAT

Helene K. Unland Weiss y Waldo Ojeda Bustamante

D.1 INTRODUCCIÓN

El sistema computacional CROPWAT (FAO, 1998) cuyas siglas significan: crop = cultivo y wat = agua) es el programa más usado para estimar los requerimientos hídricos y de riego de los cultivos usando datos de suelo, clima, y cultivo. El programa permite obtener el calendario de riego para diferentes condiciones de manejo y patrones de cultivos, tanto para condiciones de riego como de temporal o seco. El éxito del CROPWAT radica en que contiene una base de datos robusta de los parámetros calibrados para estimar los requerimientos de riego de los cultivos. Además utiliza la metodología que ha sido tomada como estándar en el medio agronómico y que se encuentra documentada en una serie de manuales publicados por la FAO, en particular el manual FAO 56 (Allen, *et. al.*, 1998). El CROPWAT es compatible con la base de datos CLIMWAT de la FAO, que contiene datos agroclimáticos de más de 5000 estaciones en todo el mundo. Otra ventaja del CROPWAT, es que la última versión programa se puede descargar sin costo del portal web de la FAO: <http://www.fao.org>

En este anexo se describe el uso del programa CROPWAT, versión 8 bajo el sistema operativo Microsoft Windows, usando un ejemplo base para seguimiento de los cálculos que realiza dicho programa.

D.2 EJEMPLO DE REFERENCIA

Para ilustrar los conceptos presentados en esta sección, usando el ejemplo presentado por Ojeda, *et. al* (2008), se presenta un ejemplo detallado para obtener la capacidad de un sistema de riego por gravedad, que suministrará la demanda de riego de una zona de riego de Los Mochis, Sinaloa, México con una superficie de 300 ha. La **Tabla D.1** presenta el plan anual propuesto con cuatro cultivos anuales (fríjol, jitomate, maíz, y papa) y un cultivo perenne (caña de azúcar).

Tabla D.1 Distribución de las fechas de siembra (FS), cosecha (FC), duración del ciclo (DC), Profundidad de Raíces (Pr), factor de abatimiento (f) y superficie (A) para el plan de cultivos propuesto.

Cultivo	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Duración del ciclo (días)	Profundidad de raíces (cm)		Área	
				inicial	máxima	ha	%
Caña de azúcar	1/01	31/12	365	120	120	100	33
Jitomate	13/10	24/02	135	25	70	10	3
Frijol	21/11	10/03	110	30	80	20	7
Maíz	25/10	17/04	175	30	100	120	40
Papa	27/11	11/03	105	30	70	50	17
						300	100

La **Figura D.1** presenta gráficamente el plan de cultivos durante el periodo de máxima demanda de agua de los cultivos que correspondería a los meses de diciembre a febrero.

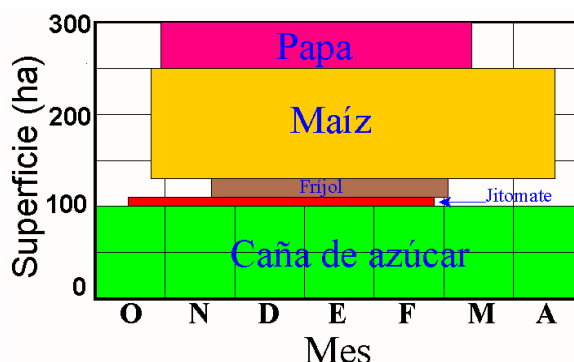


Figura D.1 Plan de cultivos de diseño en los meses de máxima demanda hídrica.

D.2.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia

Para calcular la ET_0 usando la ecuación de Penman-Monteith se requieren los siguientes datos diarios promedios:

- Temperatura máxima del día
- Temperatura mínima del día
- Humedad relativa promedio del día
- Radiación global acumulada
- Velocidad del viento promedio del día

La ecuación de Penman-Monteith usa registros climáticos estándar de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para garantizar los cálculos, las mediciones climáticas se deben realizar a 2 m de altura (o ser convertidas a un valor

equivalente) por encima de una superficie extensa de pasto verde, cubriendo el suelo y con suficiente disponibilidad de agua.

Los datos geográficos de la estación “Los Mochis” usada como referencia para los cálculos del ejemplo que se explicará en este apartado se presentan en la **Tabla D.2**.

Tabla D.2 Datos geográficos de la estación meteorológica.

Estación	Los Mochis
Latitud (grados)	24.82 ^o N
Longitud (grados)	109.0 ^o O
Elevación (msnmm)	14

En la tabla siguiente presenta los promedios diarios históricos de los meses para la estación Los Mochis, Sinaloa, México.

Tabla D.3 Datos promedios para un día típico del mes para la estación de los Mochis, Sinaloa, México.

Día	Tmax	Tmin	HR	R _s		u ₂
	°C	°C	%	MJ m ⁻² d ⁻¹	Hr luz	m/s
15/01	27	12.8	74	12.9	6	2.4
15/02	28.4	13.5	70	15.5	6.6	2.4
15/03	30.6	15.1	66	18.7	7.4	2.2
15/04	32.3	15.9	61	19.7	6.9	2.0
15/05	34.1	18.2	62	21.7	7.8	1.8
15/06	35.1	21.3	65	21	7.3	1.8
15/07	36	23.9	74	19.4	6.3	1.9
15/08	35.7	23.8	78	19.0	6.4	1.9
15/09	35.4	23.6	79	17.8	6.4	1.8
15/10	34.5	20.9	76	16.9	7.3	1.7
15/11	30.3	16.5	72	14.3	6.9	1.8
15/12	26.9	13.4	75	12.2	5.9	2.2

Los valores estimados de la evapotranspiración diaria mensual de referencia para un día típico usando la ecuación de Penman-Monteith a partir de datos climáticos de la **Tabla D.3** se presentan en la **Tabla D.4**. Los procedimientos y cálculos usados para estimar la ETo se encuentran en Allen, *et al.* (1998). El software CropWat 8.0 para Windows de la FAO realiza dichos cálculos de manera automática a partir de datos climáticos, como los presentados en la **Tabla D.3**. La precipitación acumulada promedio para la zona del ejemplo se presenta en el **Tabla D.5**.

Tabla D.4 Valores diarios típicos mensuales de ETo (mm/día) para Los Mochis, Sinaloa.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETo (mm/día)	2.91	3.57	4.42	4.93	5.34	5.34	5.02	4.79	4.42	4.12	3.34	2.74

Tabla D.5 Precipitación mensual acumulada promedio (mm) y diaria (mm/día) observada para Los Mochis, Sinaloa.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precip (mm)	13.1	18.6	8.4	1.3	5.9	10.4	43.2	90	90.4	33.7	39.3	36.6
Precip (mm/día)	0.42	0.66	0.27	0.04	0.19	0.35	1.39	2.90	3.01	1.09	1.31	1.18

En el inciso D.2.2 abajo se muestran los pasos necesarios para el cálculo de la ETo y de los requerimientos de riego de los cultivos utilizando el software CropWat 8.0.

D.2.2 Parámetros para la programación de riego

Cultivos

El siguiente cuadro presenta los parámetros requeridos por etapa fenológica para programar el riego: factor de abatimiento, coeficiente de cultivo y duración. Los datos de la **Tabla D.6** han sido calibrados para riego por gravedad en la región de los Mochis, Sinaloa. Ante la falta de parámetros calibrados en campo, una primera fuente de consulta es el manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998) o el software CropWat 8.0 (Smith *et al.* 2008) que contiene una base de datos para varios cultivos. Sin embargo, es necesario realizar un ajuste de dichos parámetros, sobre todo para la duración de cada etapa, para ajustarlos a las condiciones locales de interés.

Tabla D.6 Parámetros para la programación del riego en la zona de riego de Los Mochis, Sinaloa.

Cultivo	Fases														
	Inicial			Desarrollo			Intermedia			Final			Promedio		
	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)
Caña de azúcar	0.80	0.3	70	-	-	105	0.60	1	110	0.80	0.9	80	0.70	0.7	365
Jitomate	0.60	0.5	30	-	-	25	0.40	1	55	0.60	0.6	25	0.50	0.6	135
Frijol	0.70	0.4	40	-	-	20	0.40	0.9	20	0.70	0.4	30	0.50	0.7	110
Maíz	0.80	0.4	45	-	-	40	0.60	1	60	0.80	0.4	30	0.70	0.7	175
Papa	0.70	0.3	25	-	-	30	0.40	1.15	30	0.70	0.7	20	0.50	0.9	105

Suelos

Las constantes de humedad de los suelos son datos requeridos para estimar la humedad aprovechable y programar el riego de los cultivos. Para el Valle del Fuerte de Los Mochis, Sinaloa los datos del suelo se presentan en la **Tabla D.7**.

Tabla D.7 Parámetros promedio de los suelos del Valle del Fuerte, Sinaloa.

Parámetro	Valor
Fracción de Arcilla	50 %
Fracción de Limo	30 %
Fracción de Arena	20 %
Materia orgánica	0.8 %
Densidad aparente (D_a)	1.2 g/cm ³
θ_{CC} (capacidad de campo)	0.44 cm ³ /cm ³
θ_{PMP} (Punto Marchitamiento)	0.29 cm ³ /cm ³
HA (Humedad aprovechable)	0.15 cm ³ /cm ³
Profundidad máxima del suelo	300 cm

Sistema de riego

Se asumirá para el ejemplo de cálculos un sistema de riego por surcos con una eficiencia global del 50%.

D.2.3 Requerimientos y programa de riego de los cultivos

Para fines de diseño los datos climáticos usualmente están dados en la forma de valores promedio por un periodo de tiempo que puede ser una semana, una decena o un mes. Para poder realizar cálculos se tienen que realizar interpolaciones. Para este ejemplo, los datos están dados para un día típico del mes, por lo que por facilidad se asume para todos los días del mes el mismo valor promedio diario (expresado en mm/día) tanto para ET_o como precipitación dado por los datos de las **tablas D.4 y D.5**.

Requerimientos de riego y capacidad del sistema para la papa

A continuación se presentan los requerimientos de riego para el cultivo de papa. La **Tabla D.8** presenta los requerimientos de riego para periodos de 10 días (décadas). Las columnas uno (Mes) y dos (Década) define el inicio de cada periodo de cálculo. La columna tres define la etapa de desarrollo correspondiente al intervalo. El coeficiente de cultivo promedio (K_c) y la ET_o acumulada para el periodo de 10 días se muestran en columnas cuatro y cinco, respectivamente. La columna seis calcula la ET_c (evapotranspiración real del cultivo) como producto de ET_o y K_c . La columna siete (Pe) es la precipitación efectiva acumulada en el periodo. La columna ocho representa el requerimiento de riego en el periodo ($ET_c - Pe$). Cabe mencionar que el RR se toma como cero cuando la precipitación efectiva correspondiente al periodo es igual o mayor a la ET_c .

Tabla D.8 Requerimientos de riego para el periodo para el cultivo de papa.

Mes	Decada	Etapa	K_c coef	ET_o mm/día	ET_c mm/dec	Pe mm/dec	RR mm/dec
Nov	3	Inic	0.3	0.94	3.8	4.9	0
Dic	1	Inic	0.3	0.88	8.8	12.3	0
Dic	2	Inic	0.3	0.82	8.2	12.4	0
Dic	3	Des	0.45	1.24	13.7	9.7	4
Ene	1	Des	0.75	2.14	21.4	5.8	15.5
Ene	2	Des	1.04	3.03	30.3	3	27.2
Ene	3	Med	1.17	3.66	40.3	4	36.3
Feb	1	Med	1.17	3.92	39.2	5.9	33.4
Feb	2	Fin	1.17	4.17	41.7	6.7	35.1
Feb	3	Fin	1.05	4.03	32.3	5.4	26.9
Mar	1	Fin	0.84	3.49	34.9	3.8	31.1
Mar	2	Fin	0.72	3.18	3.2	0.3	3.2
Total					277.8	74.1	212.7

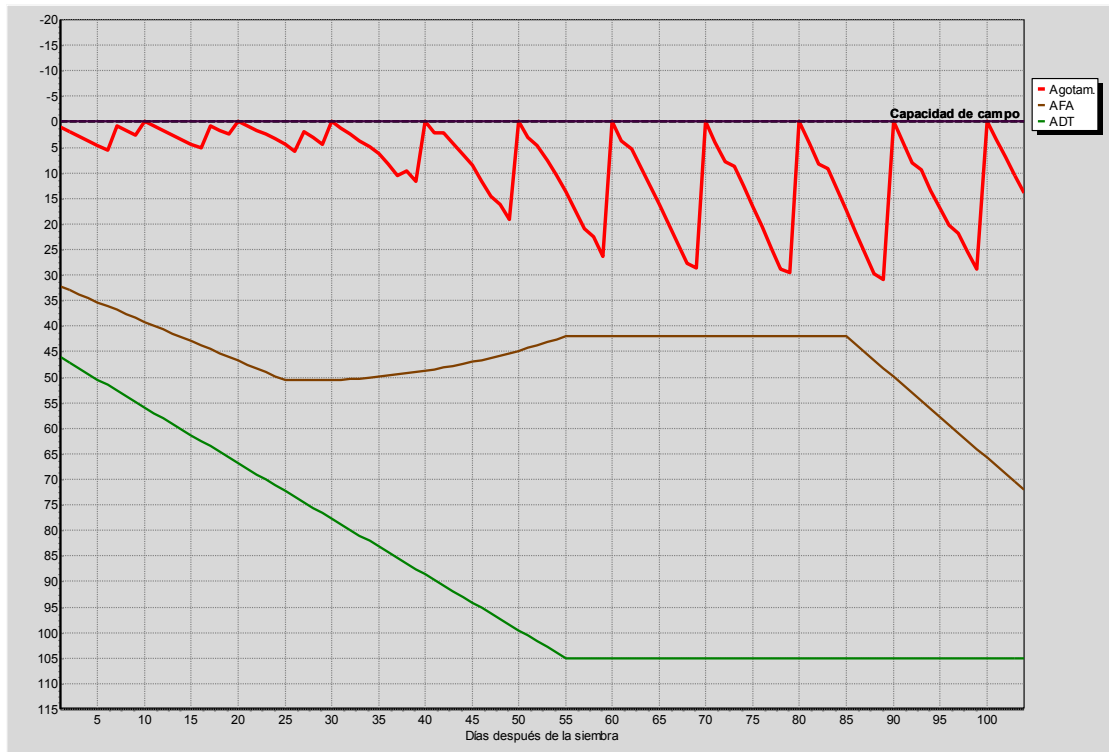
Programa de riego para la papa

La **Tabla D.9** presenta el programa de riegos para el cultivo de papa de acuerdo a los datos del ejemplo, asumiendo una eficiencia de riego global del 50%. El coeficiente unitario máximo de riego para el cultivo de papa es de 0.81 lps/ha, correspondiendo a la fecha 24 de febrero.

Tabla D.9 Programa de riego para el cultivo de papa con fecha e intervalo de riego, y requerimientos de riegos netos y brutos.

Fecha	Días desde inicio de riego	Etapa	RR net mm	RR brut mm	Caudal l/s/ha
06-dic	10	Ini	3.5	7	0.08
16-dic	20	Ini	3.3	6.6	0.08
26-dic	30	Des	5.6	11.3	0.13
05-ene	40	Des	13.9	27.7	0.32
15-ene	50	Des	22.2	44.4	0.51
25-ene	60	Med	29.9	59.8	0.69
04-feb	70	Med	32.6	65.2	0.75
14-feb	80	Med	33.7	67.5	0.78
24-feb	90	Fin	35	69.9	0.81
06-mar	100	Fin	32.4	64.8	0.75
Total			212.1	424.2	

La **Figura D.2** presenta gráficamente la distribución de los riegos del cultivo de papa de la **Tabla D.9**. Se presenta también como referencia la humedad disponible (línea roja), la humedad aprovechable (línea café) y la humedad fácilmente aprovechable en la zona de raíces (línea verde).

**Figura D.2.** Variación de la humedad del suelo para el cultivo de papa.

Requerimientos de riego de la zona de riego

La **Tabla D.10** muestra el resumen para el plan de cultivos propuesto en la **Tabla D.1** y **Figura D.1**, de los requerimientos de riego mensuales por cultivo, requerimientos de riego netos del sistema y del área real cultivada en cada mes.

Tabla D.10 Programa de riego para el plan de cultivos propuesto.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Req. de riego (mm/mes)												
1. Caña de Azucar	14.7	12.1	38.7	77.2	114.1	137	113	68.5	53.4	91	58.2	44.7
2. Papa	79.1	95.3	34.3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3. Jitomate	94.8	67.4	0	0	0	0	0	0	0	19.8	29.9	66.8
4. Frijol	59	60.4	16	0	0	0	0	0	0	0	0.3	2.7
5. Maíz grano	75.7	85	122.8	45.7	0	0	0	0	0	6	3.6	13.1
Req. de riego Netos sistema												
en mm/día	1.8	2.2	2.2	1.5	1.2	1.5	1.2	0.7	0.6	1.1	0.7	0.7
en mm/mes	55.5	60.4	68.8	43.8	37.7	45.1	37.3	22.6	17.6	33	21.5	22.8
en l/s/ha	0.21	0.25	0.26	0.17	0.14	0.17	0.14	0.08	0.07	0.12	0.08	0.09
Area Irrigada (% del área total)	100	100	97	73	33	33	33	33	33	76	83	100
Req. de riego área real												
(l/s/ha)	0.21	0.25	0.26	0.23	0.43	0.53	0.42	0.26	0.21	0.16	0.1	0.09

D.3 CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS UTILIZANDO CROPWAT

El sistema computacional CropWat desarrollado para el sistema operativo MS Windows por la FAO (Smith, 2008) estima los requerimientos de riego de los cultivos con fines de planeación de zonas de riego. Dicho sistema ha sido referente para el cálculo de requerimientos de riego de zonas de riego. Los cálculos se basan en la estimación de la evapotranspiración potencial de los cultivos a partir de la evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman-Monteith con datos climáticos diarios, decadiarios o mensuales. Esta estimación es utilizada para calcular los requerimientos de riego de los cultivos, que CropWat en su versión en español denomina “Requerimientos de agua de los cultivos”, y para la programación del riego de acuerdo a un plan de cultivos de una zona de riego. Los archivos de instalación de sistema CropWat están disponibles libre de costo en la página de la FAO (http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html).

El software CropWat en su versión 8.0 para Windows, fue desarrollado por Joss Swennenhuis para la Unidad de Fomento y Gestión de las Aguas de la FAO. CROPWAT 8.0 se basa en las versiones DOS CROPWAT 5.7 de 1992 y CROPWAT 7.0 para Windows de 1999. CROPWAT 8.0 para Windows incluye una serie de características nuevas y actualizadas, incluyendo los siguientes:

- Entrada de datos climáticos en intervalos mensuales, diarios o decadiarios para el cálculo de la ETo
- Compatibilidad con versiones anteriores de tal manera que permite el uso de la información de la base de datos CLIMWAT
- Posibilidad de estimar los datos climáticos en caso de no contar con los valores medidos
- Cálculos diarios y decadiarios de los requerimientos de agua del cultivo basados en algoritmos de cálculo actualizados incluido el ajuste de los valores del coeficiente de cultivos
- Cálculo de las necesidades de agua de cultivos y la programación de riego para los cultivos y para arrozales
- La programación de riego puede ser calculado para cada cultivo o varios cultivos, además se puede seleccionar entre intervalos diarios y decadiarios de tiempo para los cálculos.
- Programaciones de riego ajustables e interactivas con el usuario
- Tablas de balances diarios de agua en el suelo

- CropWatW 8.0 puede calcular los requerimientos de riego para una zona de riego de hasta para 20 cultivos.
- Fácil guardado y recuperación de sesiones y de las programaciones de riego definidas por el usuario, facilitando la generación y comparación de diferentes escenarios bajo diferentes alternativas de manejo del riego, clima, suelo y cultivos.
- Presentaciones tabulares y gráficas de los datos de entrada, requerimientos de agua de los cultivos y programaciones de riego.
- Sencilla importación/exportación de datos y gráficos a través del portapapeles o de archivos de texto ASCII.
- Rutinas de impresión extensivas apropiadas para todas las impresoras basadas en Windows.
- Sistema de ayuda sensible al contexto.

Todos los procedimientos de cálculo, tal como se utilizan en CROPWAT 8.0 se basan en las directrices de la FAO tal como se establece en la publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO "Evapotranspiración del Cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". A continuación se describe el CropWat para Windows v8.0.

D.3.1 Pantalla principal de sistema

La pantalla principal de CropWat v.8.0 para Windows se muestra en la **Figura D.3**. El menú principal desplegable, con las opciones del sistema, se muestra en la parte superior izquierda de la ventana. Directamente abajo del menú principal, hay una serie de íconos de la barra de herramientas que permiten acceder y activar directamente a las opciones del menú principal. En la parte inferior de la ventana se muestra la barra de información con mensajes sobre el estado del sistema y opciones activas, incluyendo los archivos activos de datos de ETo, precipitación, configuración de Kc y patrón de cultivo, parámetros del suelo y fecha de siembra.

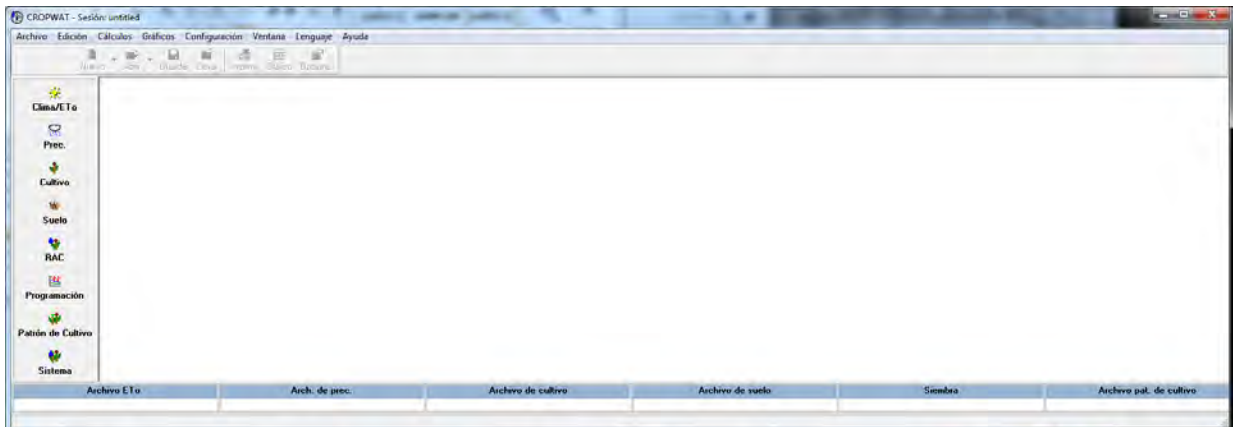


Figura D.3 Pantalla principal de CropWat para Windows v8.0 antes de cargar datos.

Siguiendo con el ejemplo para obtener los requerimientos y la programación del riego de los cultivos, se muestra a continuación el proceso secuencial de cada una de las pantallas hasta obtener los resultados de las necesidades de riego de agua de los cultivos. Cabe mencionar que en la versión 8.0 de CropWat para Windows, en la barra de herramientas superior, es posible escoger el idioma preferido. Es preferible seleccionar el idioma español, escogiendo “Spanish” del menú intitulado “Language”, para que las instrucciones, etiquetas y textos en todos los cuadros y gráficos del software sean generados en español.

Antes de iniciar con la captura de datos, es conveniente darle un nombre a la nueva sesión creada automáticamente cuando se abrió la ventana principal del CROPWAT por primera vez: de la barra del menú superior, se debe escoger al lado izquierdo “**Archivo**” y seleccionar la opción “**Guardar Sesión como ...**”, lo que abre una nueva ventana donde se nombrará a la sesión actual, en el caso de nuestro ejemplo, le llamaremos “**Mochis.ses**” (**Figura D.4**).

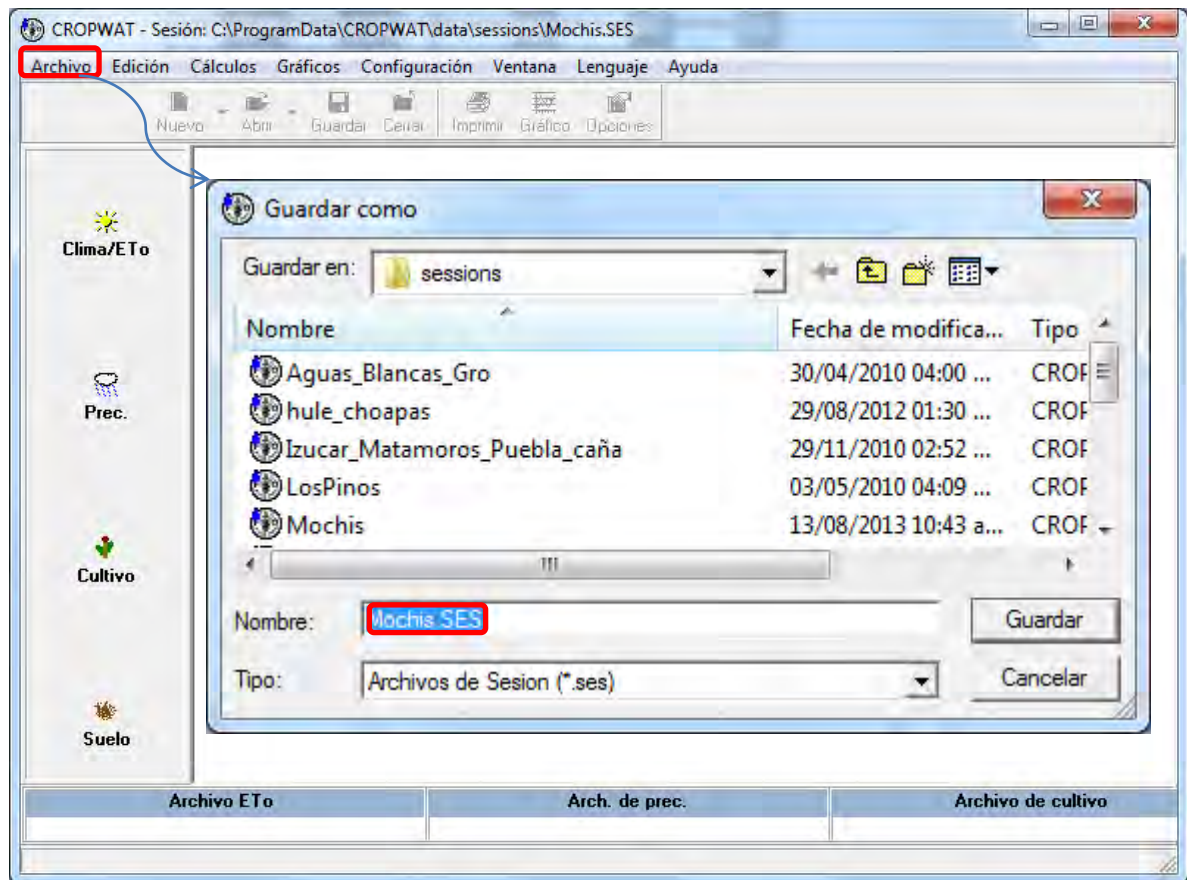


Figura D.4 Guardar la nueva sesión "Mochis.ses".

Aunque se pueden asumir las opciones de programación del riego que el sistema considera por omisión, los diversos criterios disponibles asociados a los cálculos de la ETo, precipitación efectiva, y programación del riego se puedan configurar seleccionando "Opciones" del menú "Configuración" en la barra superior del software (Figura D.5). Primero, en la pestaña "Clima/ETo", bajo "Configuración de datos" se consta si la ETo se debe calcular a partir de datos completos de clima o si solamente se utilizarán datos de la temperatura para dicho cálculo (el software generará valores estimados de los demás variables de clima). A continuación, se debe constar si se cuenta con datos de temperatura mínima y máxima, o solamente de temperatura media. En la parte baja de la ventana, se deben definir cuáles son las "Unidades" de las variables de clima disponibles para el cálculo de la ETo.

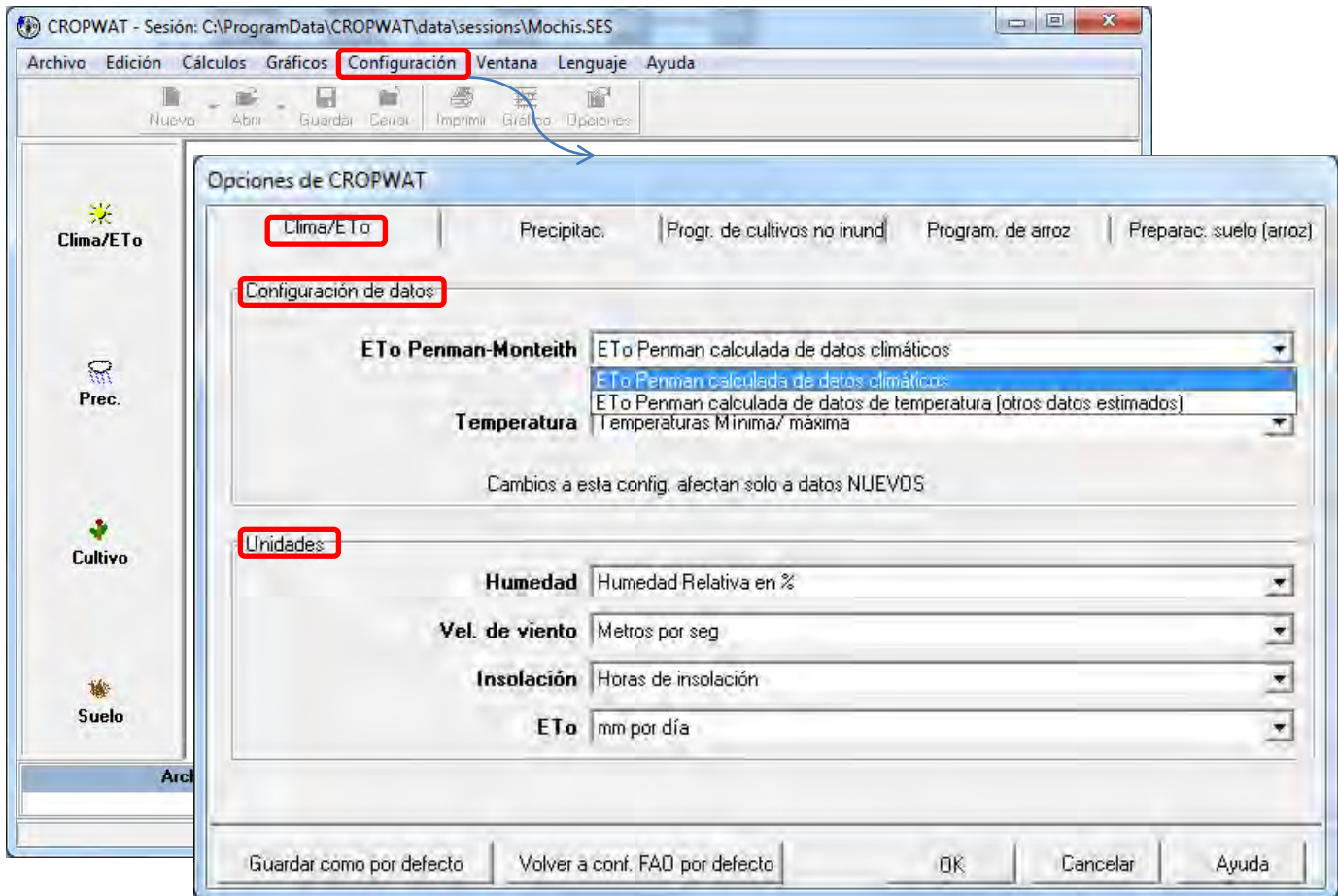


Figura D.5 Configuración de opciones de CropWat.

En la pestaña “**Precipitac.**” de la misma ventana de “**Opciones de CROPWAT**” se debe definir el método preferido para el cálculo de la precipitación efectiva en la estimación del requerimiento de riego del cultivo (**Figura D.6**). Usualmente, como es el caso de nuestro ejemplo, se escoge el método del Servicio de Conservación de Suelos de la USDA.

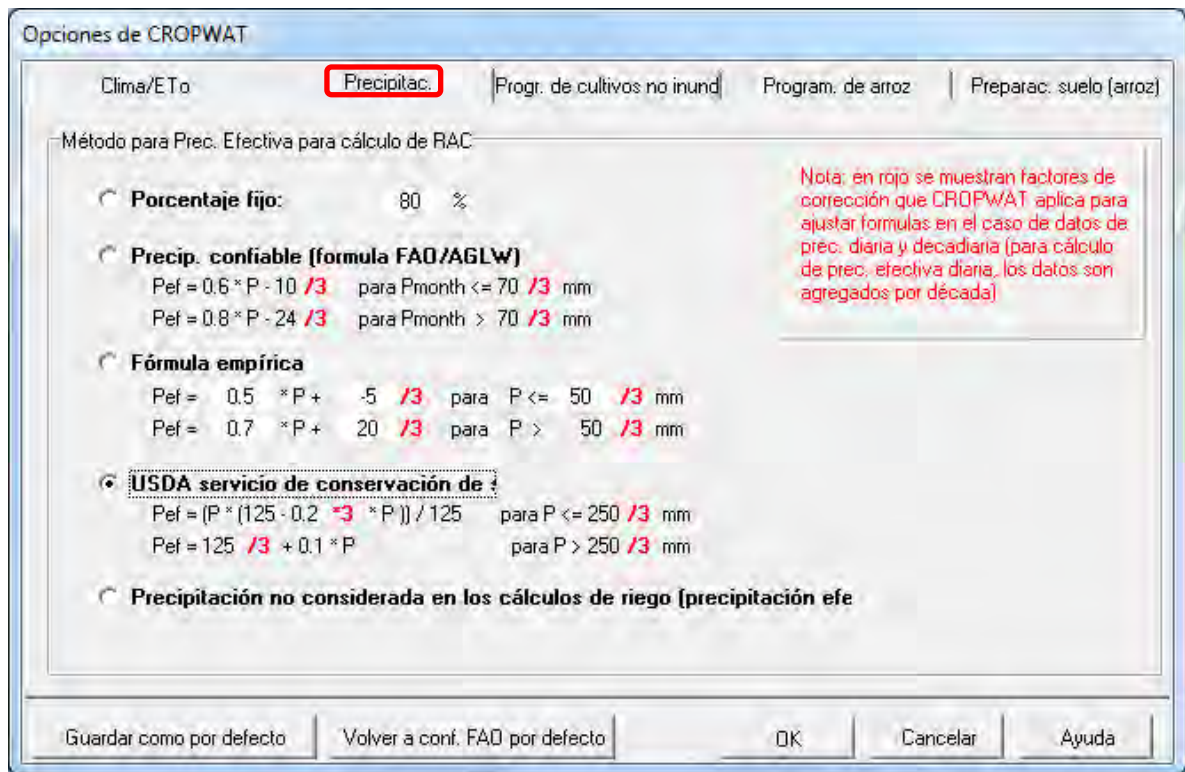


Figura D.6 Configuración de método de calcular la precipitación efectiva.

Finalmente, en la pestaña “**Prog. De cultivos no inund.**” se debe configurar los criterios de programación de riego para cultivos no inundados: método de determinar intervalo de riego, intervalos de riego por etapa, método de aplicación de riego y la eficiencia estimada de riego (Figura D.9).

En caso de nuestro ejemplo, se escogerá “**Regar a intervalo fijo por etapa**”, intervalos de 10 días para todas las etapas, aplicación de riego “**reponer a capacidad de campo**”, y “**Eficiencia de riego**” 50%.

En caso de configurar para el cultivo de arroz, se utilizará la pestaña “**Program. de arroz**”.

Al final del relleno de las pestañas de esta ventana, es conveniente “**Guardar como por defecto**” la configuración (botón inferior izquierda, Figura D.7), ya que de esta forma se puede reutilizar en sesiones subsecuentes sin tener que reconfigurar las opciones de nuevo.

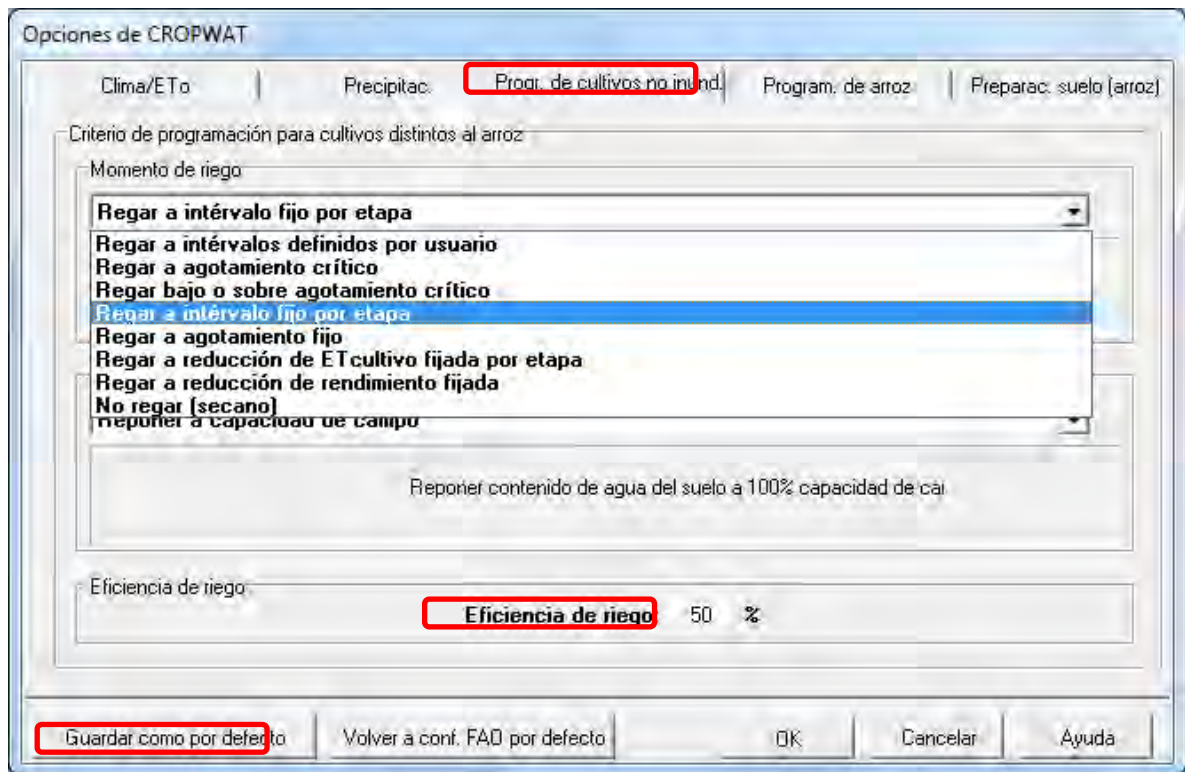


Figura D.7 Configuración de programación de riego para cultivos no inundados.

D.3.2 Datos climáticos

Para estimar los requerimientos de riego de los cultivos en el software CropWat es necesario introducir los **DATOS CLIMÁTICOS** obtenidos de estaciones meteorológicas. Para capturar e introducir los datos se utiliza el ícono “Clima/ETo” que se muestra en la barra de módulos a la izquierda superior en la **Figura D.8**. En nuestro ejemplo, se introducen el nombre de la estación, país, altitud y coordenadas de la estación Los Mochis, así como los datos climáticos. Los datos que se introducen son promedios diarios mensuales y corresponden a los valores de las temperaturas máximas y mínimas, humedad del aire, velocidad del viento y horas con insolación. Los datos introducidos se pueden guardar en un archivo de datos con la extensión *.PEM. Una vez introducidos todos los datos climáticos de los doce meses, CropWat calcula automáticamente el valor de la ETo para cada mes (última columna de la tabla a la derecha). Los archivos de datos de clima y ETo se guardarán por defecto en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate”.

En caso que se desea utilizar datos diarios o decadiarios (cada 10 días) de clima, éstos se puedan ingresar oprimiendo la flecha al lado derecho del botón

“Nuevo” después de activar el icono “Clima/ETo”, y escogiendo la opción correspondiente del menú emergente. El mismo método se puede utilizar para ingresar directamente valores medidas de la ETo diaria, decadiaria o mensual.

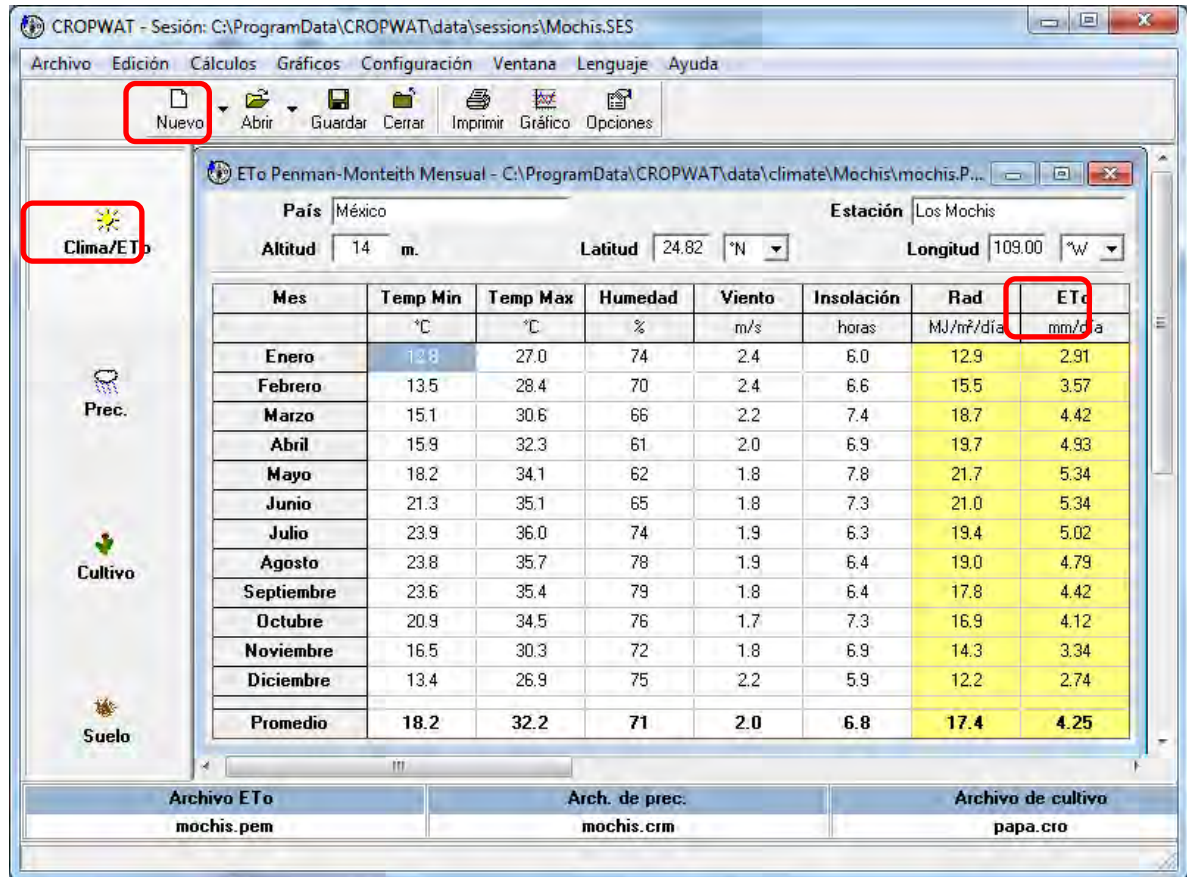


Figura D.8 Introducción de los datos climáticos.

En el segundo icono (nube pequeña intitulada “Prec.”) de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (Figura D.9) se introducen los datos de la precipitación y el software CropWat calcula automáticamente la precipitación efectiva, usando el método configurado anteriormente (Figura D.6). Los datos capturados de precipitación se graban por defecto con la extensión “*.CRM”, en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\rain”.

En el caso dado que se cuenta con datos diarios o decadiarios (cada 10 días) de precipitación, éstos se puedan ingresar oprimiendo la flecha al lado derecho del botón “Nuevo” después de activar el icono “Prec.”, y escogiendo la opción correspondiente del menú emergente.

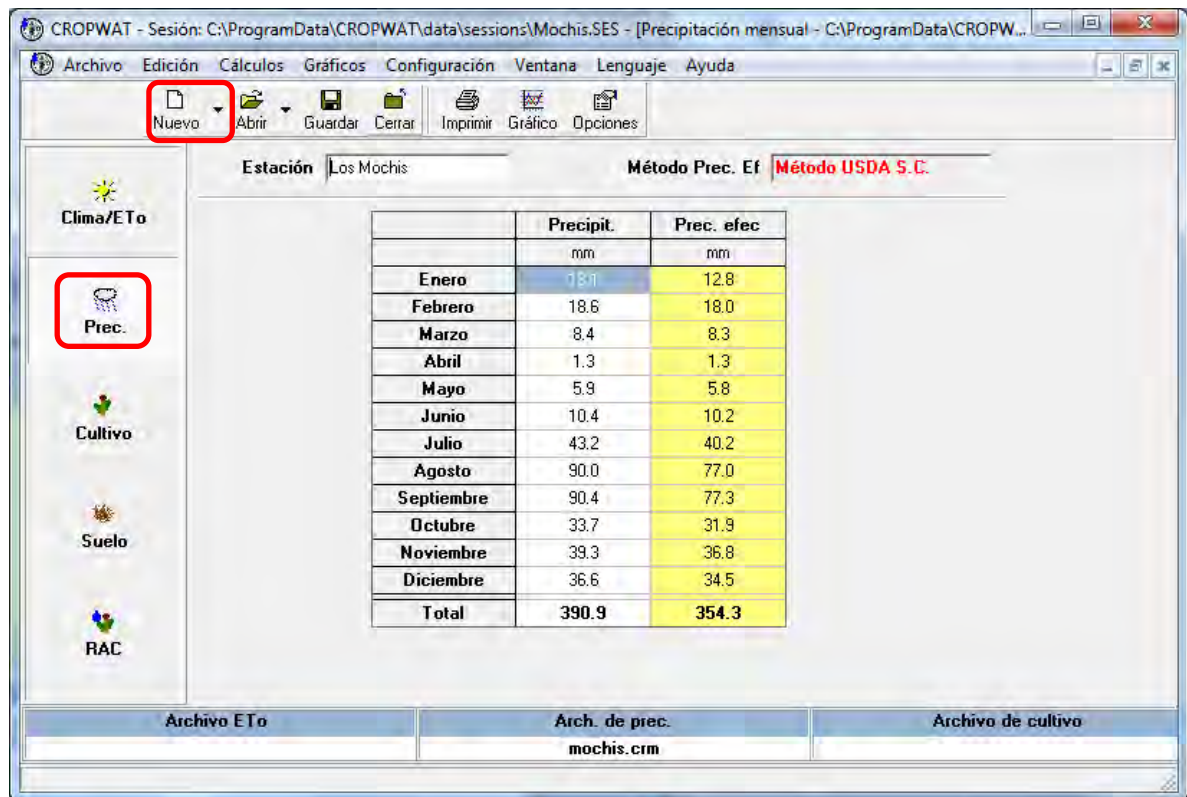


Figura D.9 Introducción de los datos de precipitación.

D.3.3 Cultivos

La captura de los parámetros de cultivo se activa con el icono “**Cultivo**” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat. Los datos de cultivo son: nombre del cultivo, fecha de siembra, los coeficientes Kc, la duración de cada etapa fenológica del cultivo, la profundidad de raíz y el factor de abatimiento. Una vez que se han capturado los datos del cultivo se pueden guardar en un archivo del tipo “*.CRO” almacenado por defecto en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\crops”. La **Figura D.10** muestra la ventana de captura de los datos de cultivo para el ejemplo del cultivo de papa, sembrado el 27 de noviembre en Los Mochis (**Tabla D.6**).

Después de capturar y guardar los datos de cultivo para cada cultivo en el padrón para la zona de riego de interés, con el icono “**Padrón de cultivo**” (**Figura D.11**) de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat se utiliza para completar el plan de cultivos, seleccionando la fecha de siembra y el porcentaje del área total sembrado en cada uno de los cultivos, en base de los datos de la **Tabla D.1**. Los archivos de datos de cultivo (*.CRO) capturados y guardados anteriormente se cargan seleccionando el icono “...” en cada renglón del plan de cultivos. Se pueden considerar hasta 20 cultivos para una misma parcela o zona de riego. Finalmente, cuando se hayan seleccionado todos los cultivos de los que se

desean obtener las necesidades de agua y la programación del riego, se puede guardar el archivo asignando un nombre con la extensión *.PAT. Este archivo tendrá la información del plan de cultivos para la zona de riego para su uso posterior y se guarda por defecto en el directorio "C:\ProgramData\CROPWAT\data\sessions".

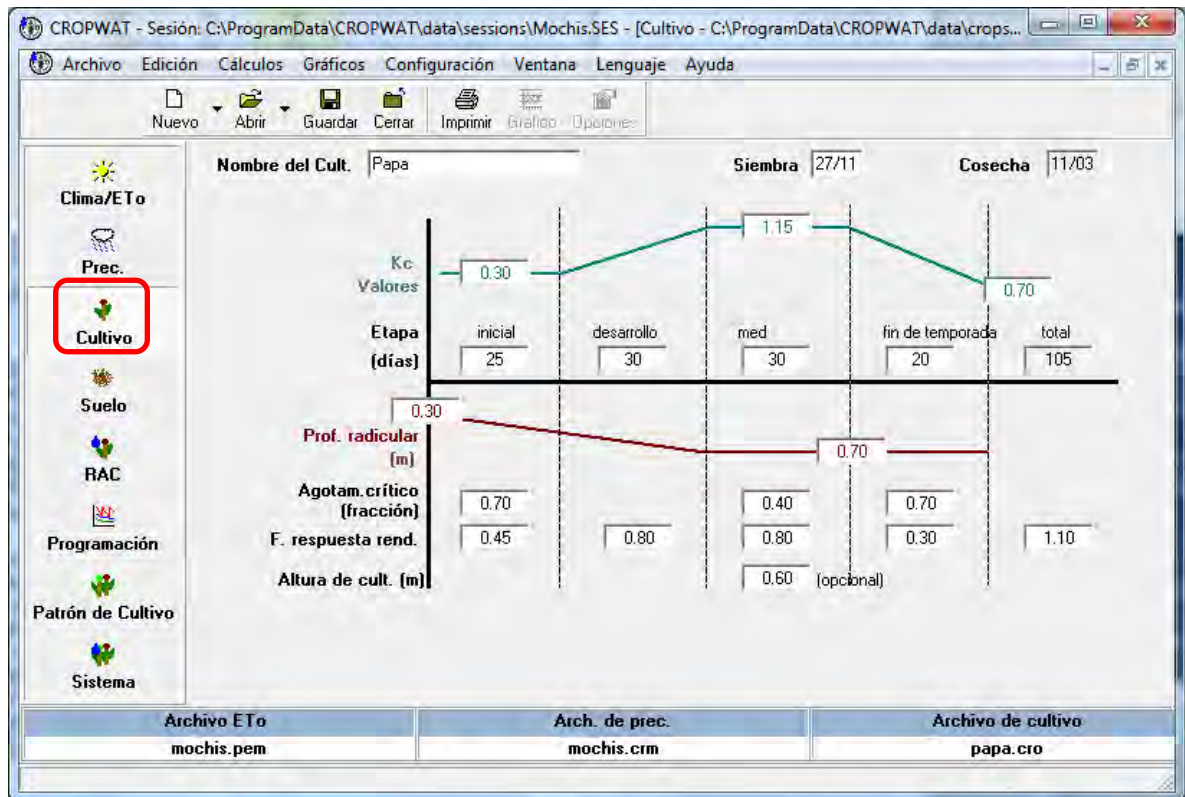


Figura D.10 Captura de parámetros del cultivo (papa).

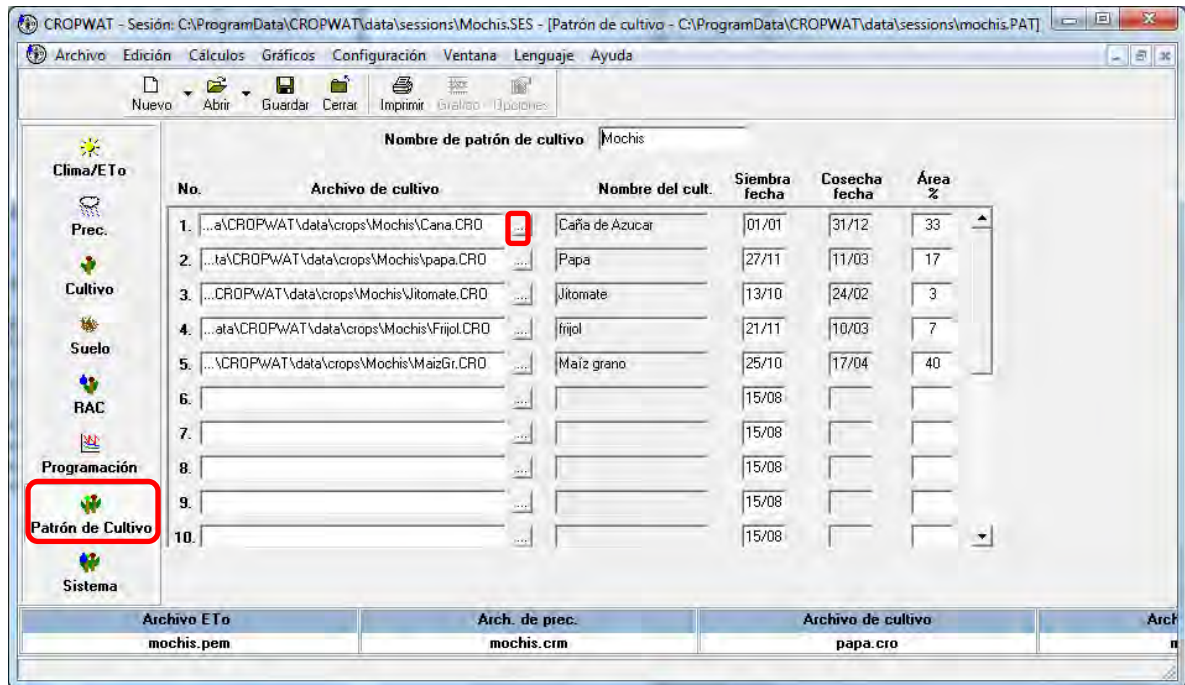


Figura D.11 Captura del padrón de cultivos.

D.3.4 Suelos

Los datos del suelo se capturan en la ventana que se activa a través del icono “Suelo” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (**Figura D.12**). Los datos requeridos son: el total de la humedad disponible en el suelo, tasa de infiltración máxima de la lluvia, profundidad máxima de raíz, porcentaje de agotamiento inicial de humedad del suelo y el valor de la humedad inicial disponible en el suelo. El archivo generado se puede guardar en un archivo con la extensión “*.SOI”; por defecto se almacenará en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils”.

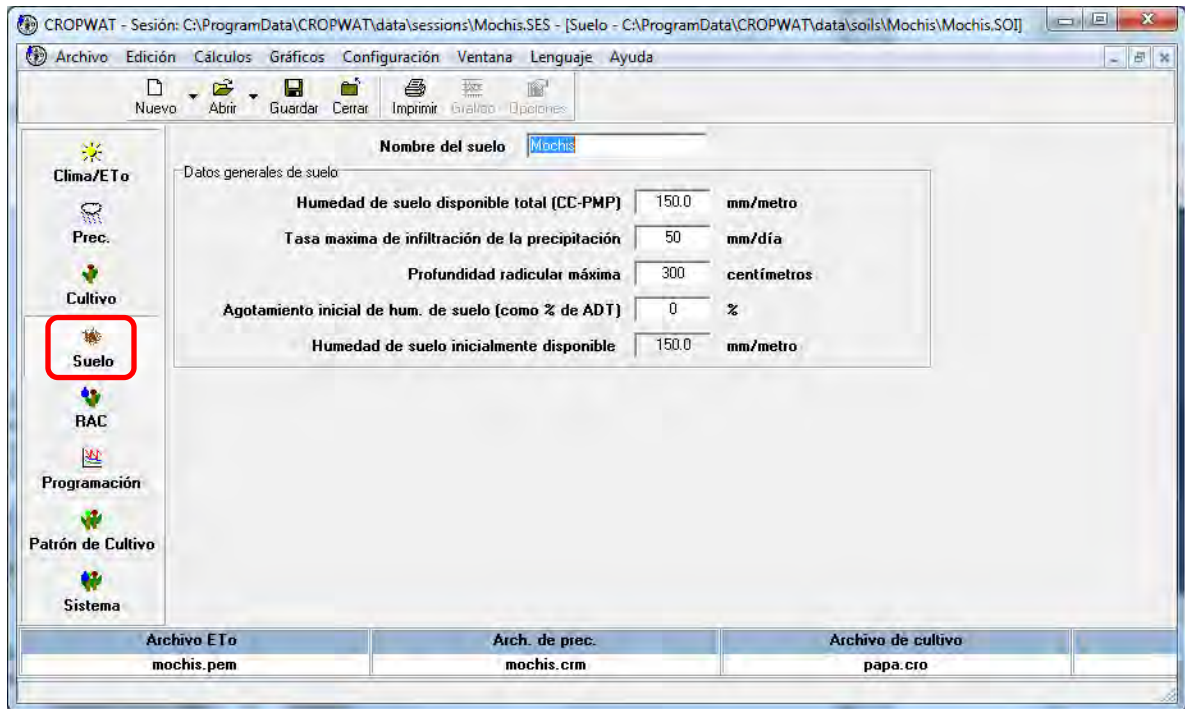


Figura D.12 Captura de los parámetros del suelo en el sistema CropWat.

D.3.5 Requerimientos y programación del riego

Cuando se han introducido todos los datos climáticos, del cultivo, suelo y de la zona de estudio y se han configurado los métodos de cálculo, el sistema CropWat está listo para mostrar los datos activos y los resultados de los cálculos ya sea por medio de tablas o gráficas. Los resúmenes tabulares de los datos de clima, ETo, precipitación total y efectiva ya se mostraron anteriormente en las **Figuras D.8 y D.9**. El resumen de los requerimientos de riego del cultivo se muestra usando el icono “**RAC**” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (**Figura D.13**).

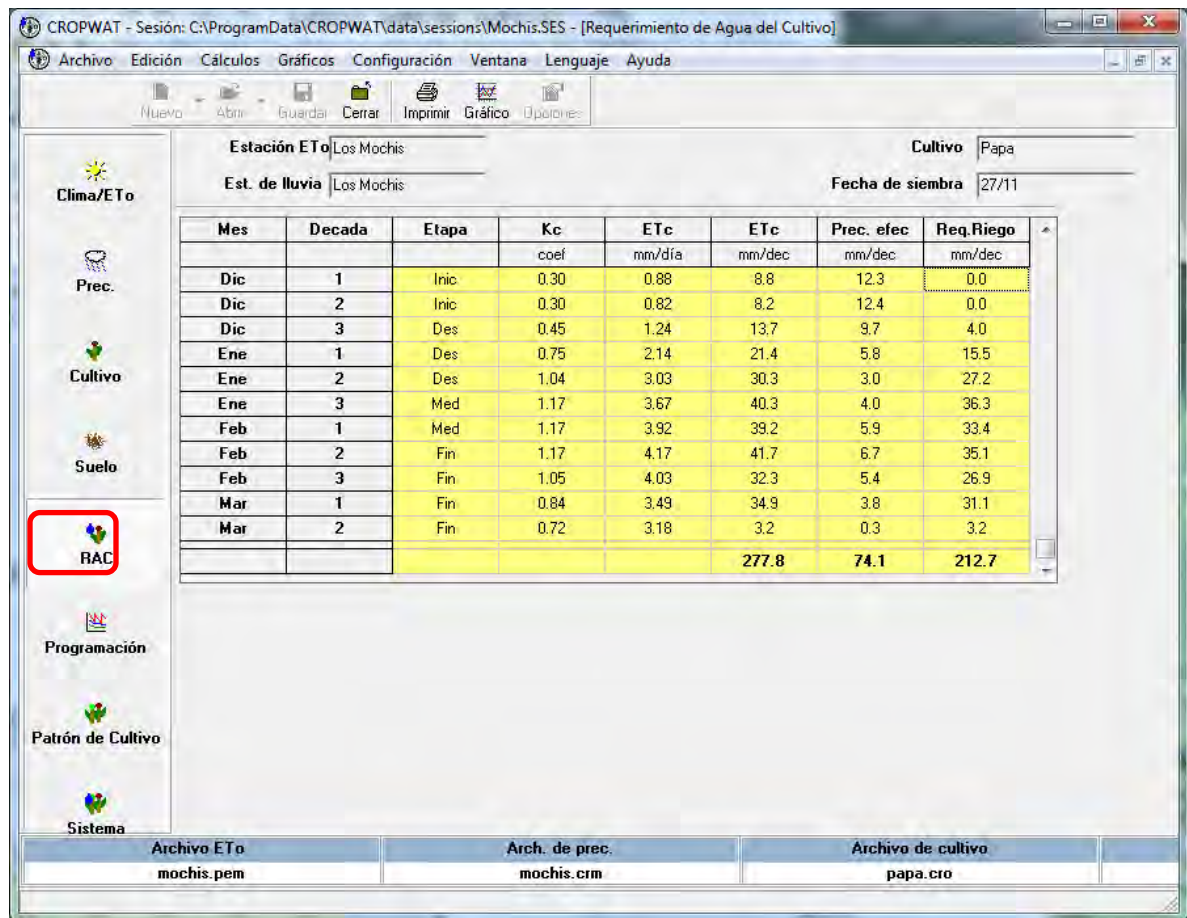


Figura D.13 Resumen del requerimiento de riego para cultivo de papa, Los Mochis.

El programa de riegos para el ejemplo del cultivo de papa en la zona de Los Mochis se muestra en la **Figura D.13**, y se activa usando el icono “**Programación**”. El resumen de los requerimientos y del programa de riego para todos los cultivos del plan de la zona de riego se puede visualizar para el año agrícola usando el icono “**Sistema**” (**Figura D.14**).

Los resúmenes antes mencionados se pueden exportar en un formato fácilmente pegado a una hoja de cálculo o documento de Word, usando el botón “**Edición**” y escogiendo “**Copiar Tabla**” y “**Solo datos**” o “**Datos y encabezamientos**” en el menú superior de la ventana principal de CROPWAT (**Figura D.14**).

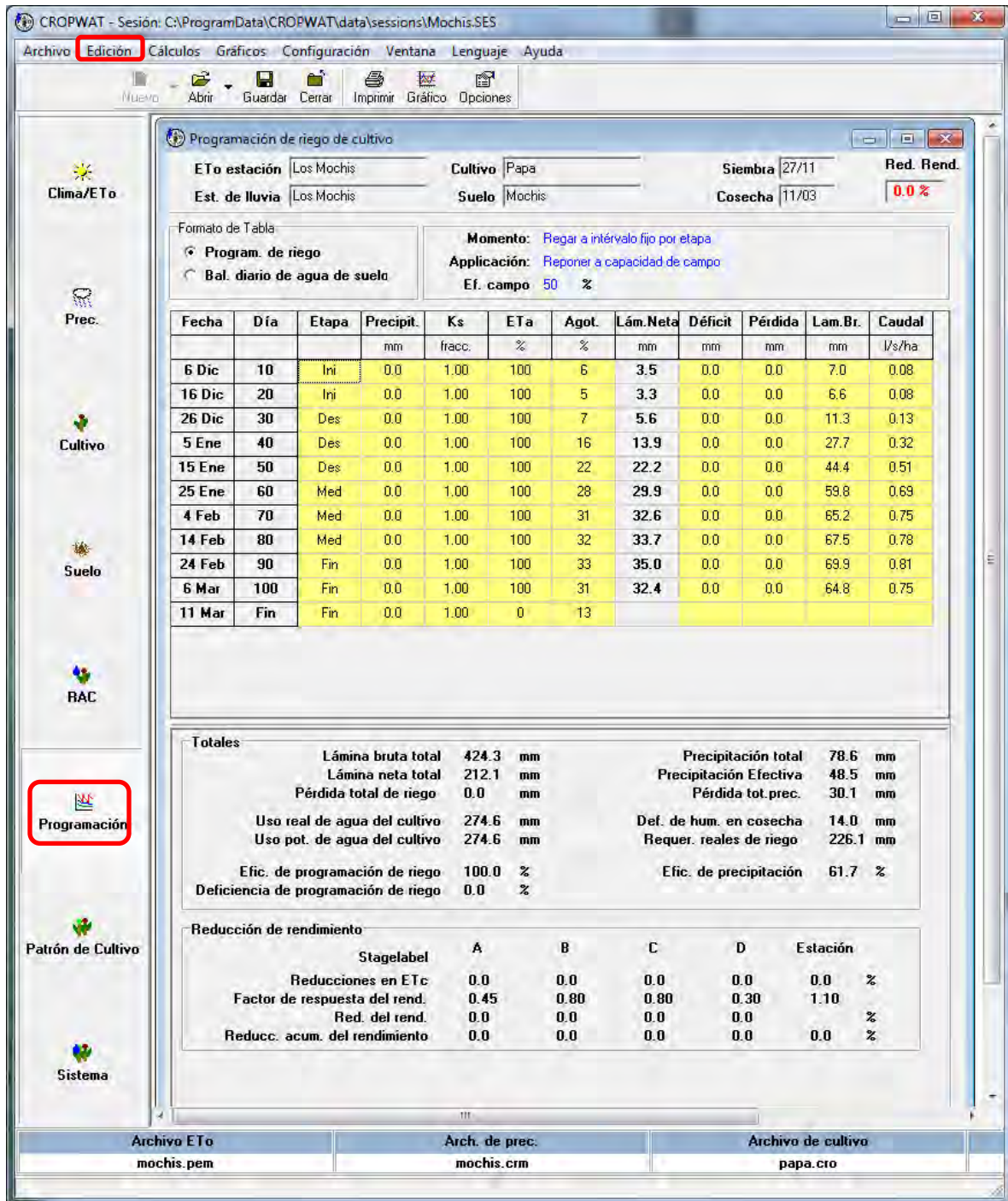


Figura D.14 Resumen de programación del riego para el cultivo de papa, Los Mochis.

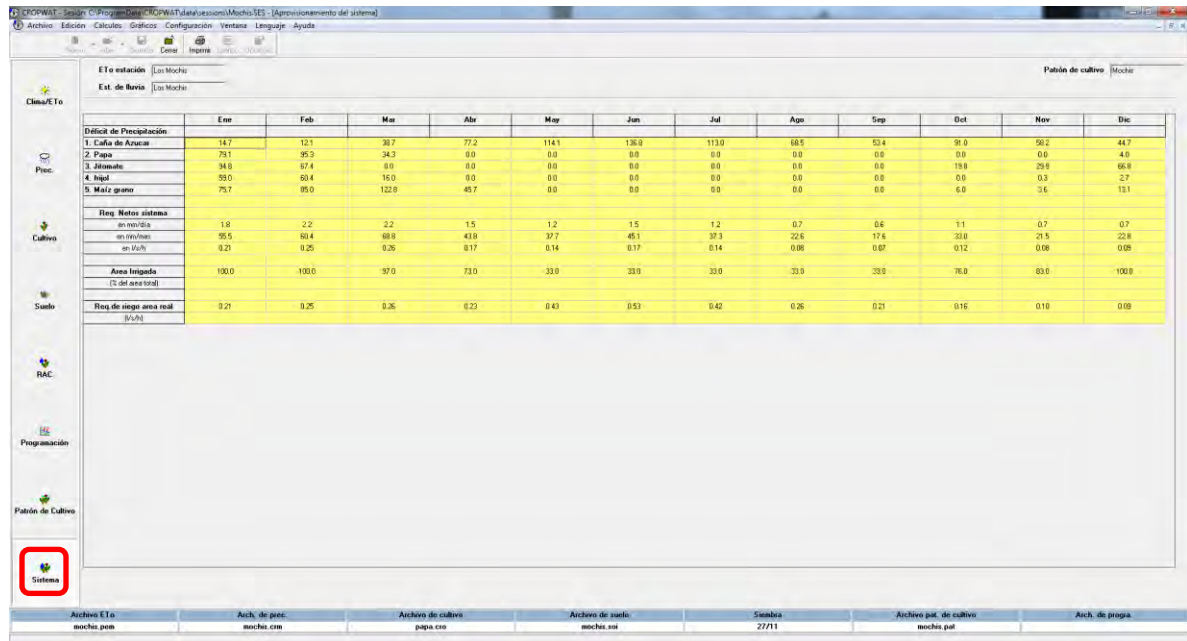


Figura D.15 Resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis.

Adicionalmente, con el botón “**Gráficos**” se puede generar gráficos simples de los datos de clima, ETo, precipitación, requerimientos y programación de riego para cada cultivo (Figura D.16). Figuras D.16 a D.19 muestran las gráficas de las variables climáticas y de la evapotranspiración de referencia para la estación meteorológica usado para la zona de riego de Los Mochis.

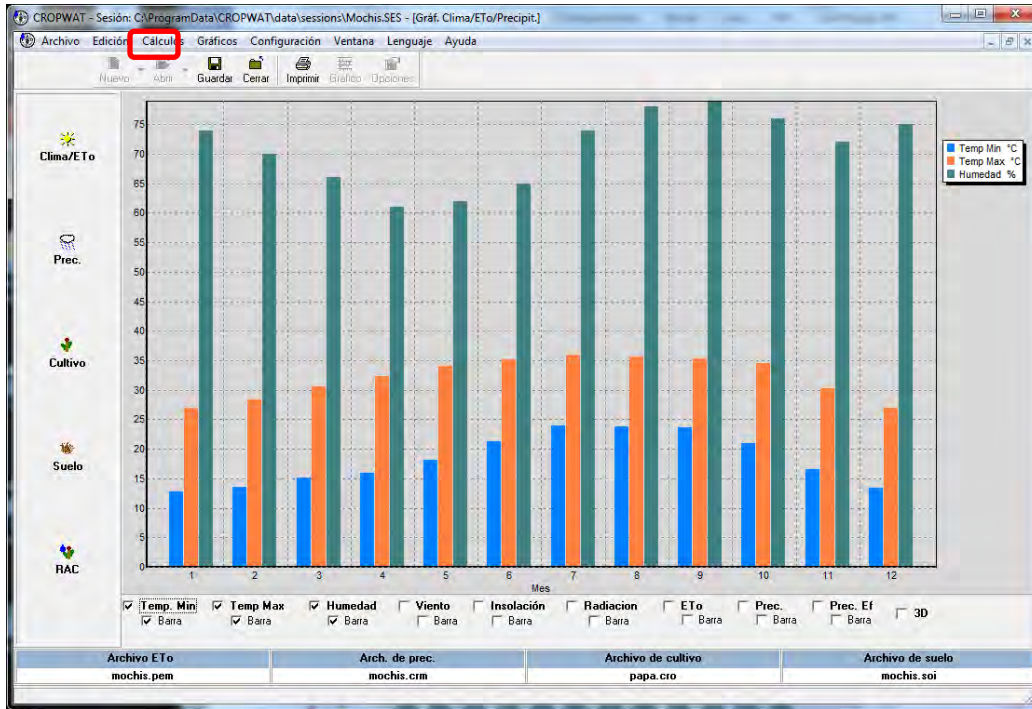


Figura D.16 Gráfica de la temperatura mínima y máxima mensual para la estación de Los Mochis.

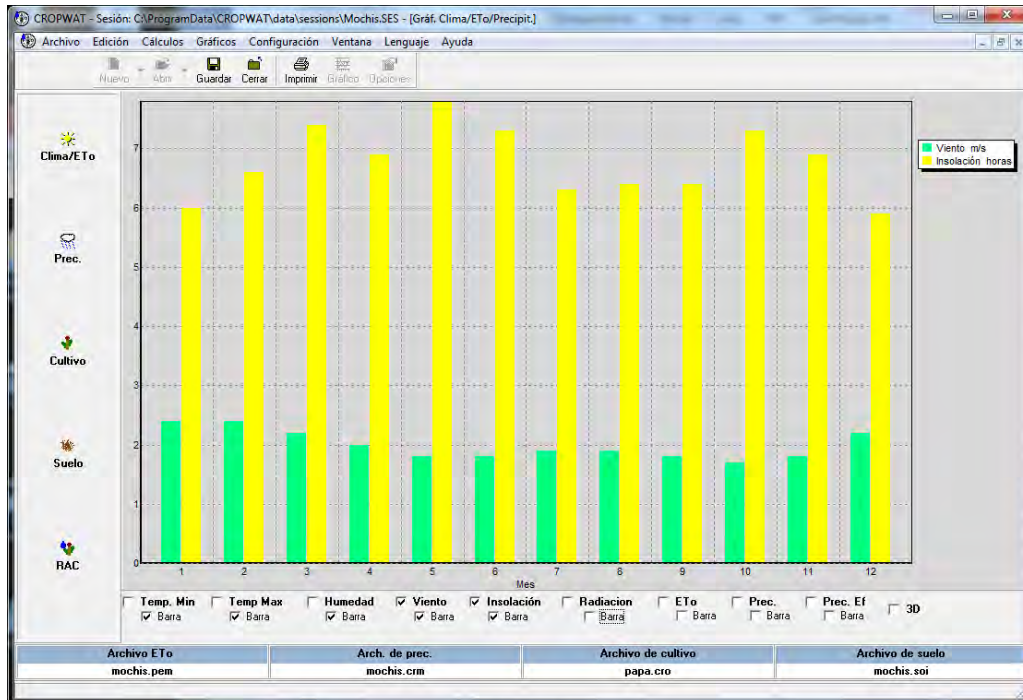


Figura D.17 Gráfica de la velocidad del viento y insolación mensual para la estación de Los Mochis.

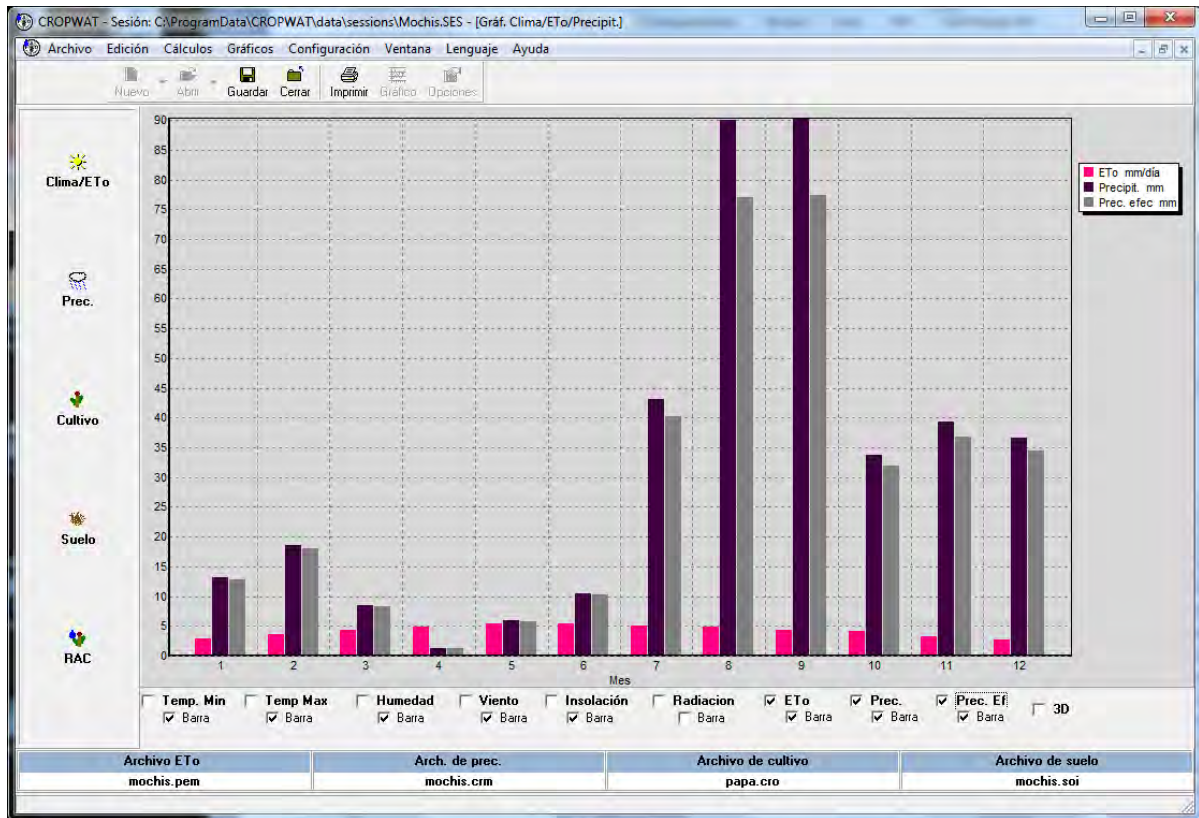


Figura D.18 Gráfica de la evapotranspiración de referencia, precipitación total y efectiva mensual para la estación de Los Mochis.

La **Figura D.19** muestra la gráfica de la evapotranspiración real y del requerimiento de riego para el cultivo de papa; mientras que la gráfica de la programación del riego y del déficit de humedad del suelo para el cultivo de papa se muestra en la **Figura D.19**. Las gráficas generadas en CropWat se pueden exportar en un formato fácilmente pegado a una hoja de cálculo o documento de Word, similarmente a la exportación de resúmenes, usando el botón “**Edición**” en el menú superior de la ventana principal de CROPWAT y escogiendo del menú desplegable “**Copiar gráfico**” y “**Como mapa de Bits**” o “**como metarchivo mejorado**” (**Figura D.20**).

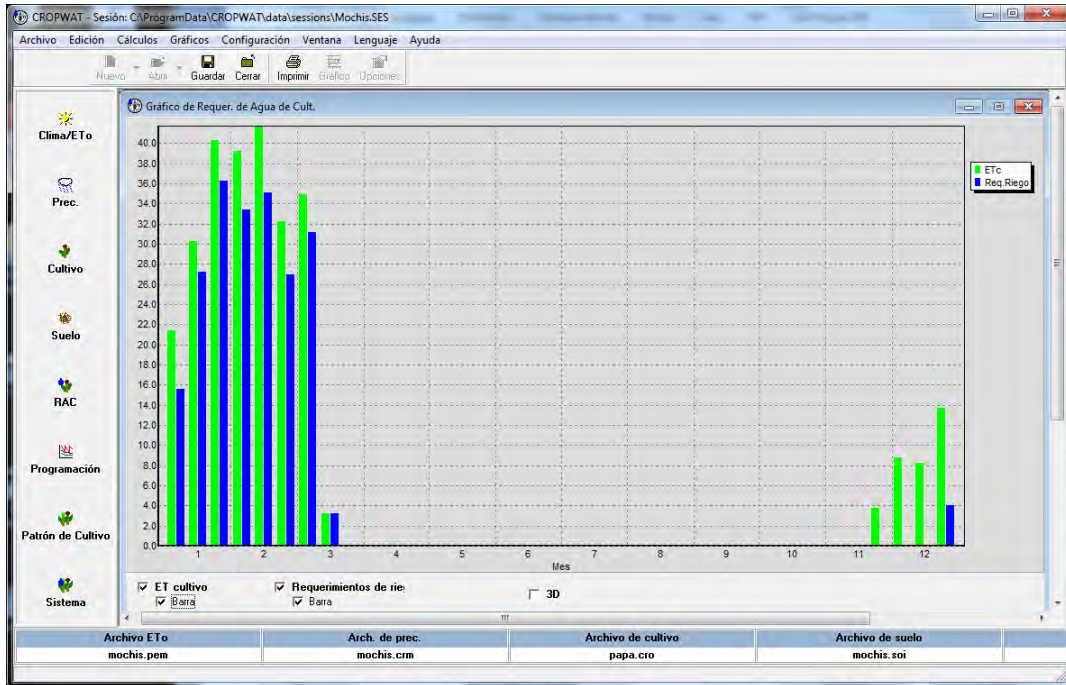


Figura D.19 Gráfica de la evapotranspiración real y requerimiento de riego para papa.

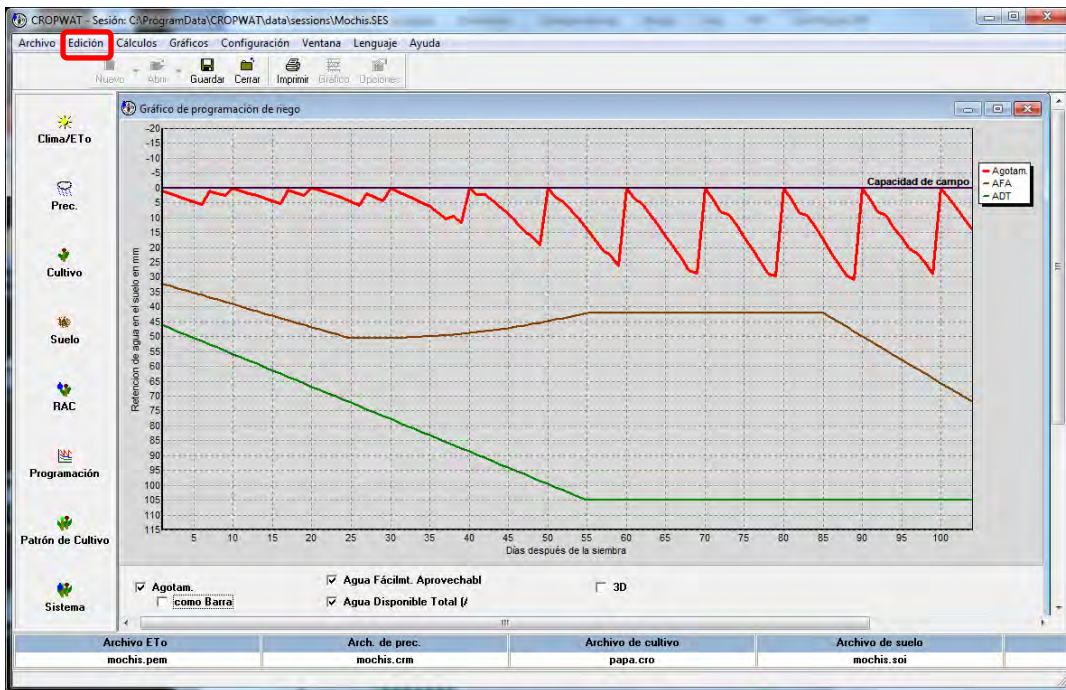


Figura D.20 Gráfica del programa de riegos y el déficit de humedad de agua en el suelo para papa.

La **Tabla D.11** muestra la tabla exportada de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis, usando el cuadro desplegado en **Figura D.15**. Con la información obtenida en este cuadro, se pueden tomar decisiones con fines de planeación y diseño de pequeñas zonas de riego. Para la

planeación de las zonas de riego es necesario conocer los requerimientos de riego pico de la zona de acuerdo a un plan de cultivos, esto es con la finalidad, entre otras cosas, para diseñar la infraestructura hidráulica de riego, para el caso de Los Mochis los valores máximos se presentan cuando todos los cultivos se encuentran en desarrollo y ocupan entre un 90 y 100% del área sembrada de la zona de riego, el valor más alto del requerimiento de riego neto de los cultivos se presenta en el mes de marzo con un valor de 68.8 mm/mes, mientras que, el coeficiente unitario de riego más alto se presenta en junio con 0.53 lps/ha. Los valores promedio durante el año agrícola, para satisfacer los requerimientos de riego son de 466.1 mm/año, con un coeficiente unitario promedio de riego de 0.26 lps/ha, considerando una eficiencia del 50% para el sistema de riego.

Tabla D.11 Tabla exportada de CropWat con resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Déficit de Precipitación												
1. Caña de Azúcar	14.7	12.1	38.7	77.2	114.1	136.8	113	68.5	53.4	91	58.2	44.7
2. Papa	79.1	95.3	34.3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3. Jitomate	94.8	67.4	0	0	0	0	0	0	0	19.8	29.9	66.8
4. frijol	59	60.4	16	0	0	0	0	0	0	0	0.3	2.7
5. Maíz grano	75.7	85	122.8	45.7	0	0	0	0	0	6	3.6	13.1
Req. Netos sistema												
en mm/día	1.8	2.2	2.2	1.5	1.2	1.5	1.2	0.7	0.6	1.1	0.7	0.7
en mm/mes	55.5	60.4	68.8	43.8	37.7	45.1	37.3	22.6	17.6	33	21.5	22.8
en l/s/h	0.21	0.25	0.26	0.17	0.14	0.17	0.14	0.08	0.07	0.12	0.08	0.09
Area Irrigada	100	100	97	73	33	33	33	33	33	76	83	100
(% del area total)												
Req.de riego area real	0.21	0.25	0.26	0.23	0.43	0.53	0.42	0.26	0.21	0.16	0.1	0.09
(l/s/h)												

D.4 LITERATURA CONSULTADA

Allen R. G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Irrigation and Drainage paper 56. FAO. Roma, Italia. 300 pp.

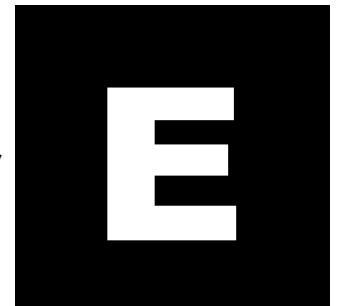
FAO. 1998. CropWat 8.0 software

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

Ojeda, W., L. Hernández, y I. Sanchez. 2008. Requerimientos de riego de los cultivos. Eds. B. de León y B. Robles. Capítulo 1.2 del libro "Diseño de pequeñas zonas de riego". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp. 1.15-1.48.

Smith, M., D. Clarke, y K. El-Askari. 2008. "Cropwat 8.0 for Windows: User Guide, 97pp." FAO, Rome.

Anexo
AquaCrop: una herramienta para generar
calendarios de riego



ANEXO E

AQUACROP: UNA HERRAMIENTA PARA GENERAR CALENDARIOS DE RIEGO

Hilario Flores Gallardo, Waldo Ojeda Bustamante, Agustín Ruiz García y Héctor Flores Magdaleno

E.1 INTRODUCCIÓN

La agricultura presenta grandes retos a nivel mundial para satisfacer las demandas alimenticias de la población así como convertirse en una actividad sustentable para continuar produciendo rendimientos óptimos. Dicha situación es resultado de la gran interacción que presentan las plantas cultivadas con el ambiente y otros factores que permiten o restringen una adecuada productividad agrícola, requiriendo la adición de insumos de origen químicos u orgánicos para favorecer el desarrollo de los cultivos aunado a un manejo agronómico adecuado para asegurar la sanidad y calidad de la producción.

La producción de los cultivos está relacionada con la tasa de desarrollo de los procesos fisiológicos que ocurren en la planta, los cuales dependen en gran medida de las condiciones ambientales existentes y variables. En este contexto, la agricultura es el sector productivo más dependiente a la variabilidad climática porque la demanda evaporativa de la atmósfera define en gran medida la evapotranspiración de los cultivos. Por lo tanto, la implantación de modelos en los sistemas computacionales puede mejorar la toma de decisiones para asignar recursos e insumos en tiempo y forma, al simular el desarrollo y respuesta de los cultivos. El avance y desarrollo de las herramientas computacionales de aplicación agrícola como los modelos de simulación de cultivos son de gran importancia para entender y analizar el funcionamiento de los sistemas de producción agrícola bajo diferentes alternativas de manejo, este tipo de herramientas pueden ser de gran apoyo para la toma de decisiones durante los procesos de planificación, de desarrollo y de producción agrícola (Flores-Gallardo, 2010).

La seguridad alimentaria es un reto actual de México para producir suficiente cantidad de alimentos, con calidad y precio accesibles. La agricultura de riego ha sido importante para suministrar las demandas en constante aumento de alimentos de una población en continuo crecimiento y en una superficie que se ha mantenido casi estable en las últimas cuatro décadas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012). En México, las grandes zonas de riego se ubican en regiones áridas y semiáridas que requieren de una adecuada regulación y distribución del agua, que es un bien escaso y vital que asegura una producción agrícola económicamente viable (Flores-Gallardo *et al.*, 2012). Debido a que la competencia por la disponibilidad de agua es cada vez más fuerte, existe la

necesidad de generar un reconocimiento económico, social y ambiental al buen uso del agua (Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Por tal motivo, para que una calendarización y la supervisión del servicio de riego en grandes zonas sean efectivas, es importante el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego con base en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego, lo cual demanda de modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006).

La posible intensificación del ciclo hidrológico, con cambios en los patrones climáticos actuales por efectos del cambio climático, demandará el uso frecuente de herramientas para conocer con mayor certidumbre la respuesta de los cultivos bajo condiciones climáticas cambiantes (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Como la respuesta de los cultivos a las variaciones en el déficit hídrico es compleja, usualmente se recurre al uso de funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico, aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo del cultivo. Una alternativa son los modelos de simulación biofísica de cultivos que manejan relaciones para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo utilizando características genéticas, agronómicas y condiciones ambientales durante el desarrollo de los cultivos (Monteith, 1996). En las últimas décadas se han utilizado diferentes modelos para simular la respuesta de los cultivos bajo diferentes condiciones de producción a nivel parcelario. El uso de los modelos de simulación biológica puede utilizarse para estimar la producción potencial, predicción fenológica de la planta, identificar factores limitantes en la producción de los cultivos mediante la estimación de requerimientos hídricos y nutricionales bajo la interacción climática de la región de interés (Flores-Magdaleno *et al.*, 2014). El modelo biofísico más usado es el DSSAT, que permite estimar los efectos de las diferentes prácticas de manejo y las condiciones ambientales sobre los cultivos (Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2012). Otros modelos que permiten simular el desarrollo de un cultivo de gran importancia alimenticia y económica como el maíz (*Zea mays* L.) son el CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003) y el Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004). De acuerdo con Heng *et al.* (2009), estos modelos sofisticados demandan habilidades para su calibración y operación, además de requerir un gran número de parámetros, algunos específicos por variedad o híbrido, lo que finalmente complica su adopción por los agricultores o usuarios finales.

El modelo AquaCrop liberado por la FAO (Raes *et al.*, 2009a), puede utilizarse como herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades, considerando las condiciones climáticas de la región y parámetros del cultivo de interés (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Este modelo determinístico está orientado a usuarios con limitados conocimientos computacionales, es simple sin perder exactitud porque usa un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009b) y ha sido calibrado, con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo, sin embargo, solamente Flores-Gallardo *et al.* (2013) ha reportado su aplicación para las condiciones de manejo y clima de la agricultura mexicana, por lo cual se aborda en el presente anexo su descripción y utilidad para generar calendarios de riego en el cultivo de maíz.

E.2 DESCRIPCIÓN TEORICA

El modelo AquaCrop (**Figura E.1**) fue desarrollado para simular el desarrollo y rendimiento de varios cultivos especialmente bajo condiciones hídricas o con respuesta al suministro del riego. A pesar de lo anterior, el modelo tiene en su estructura la bondad para generar simulaciones bajo condiciones de temporal (sin riego) para los diversos cultivos que están integrados en la base de datos de su sistema informático (software).

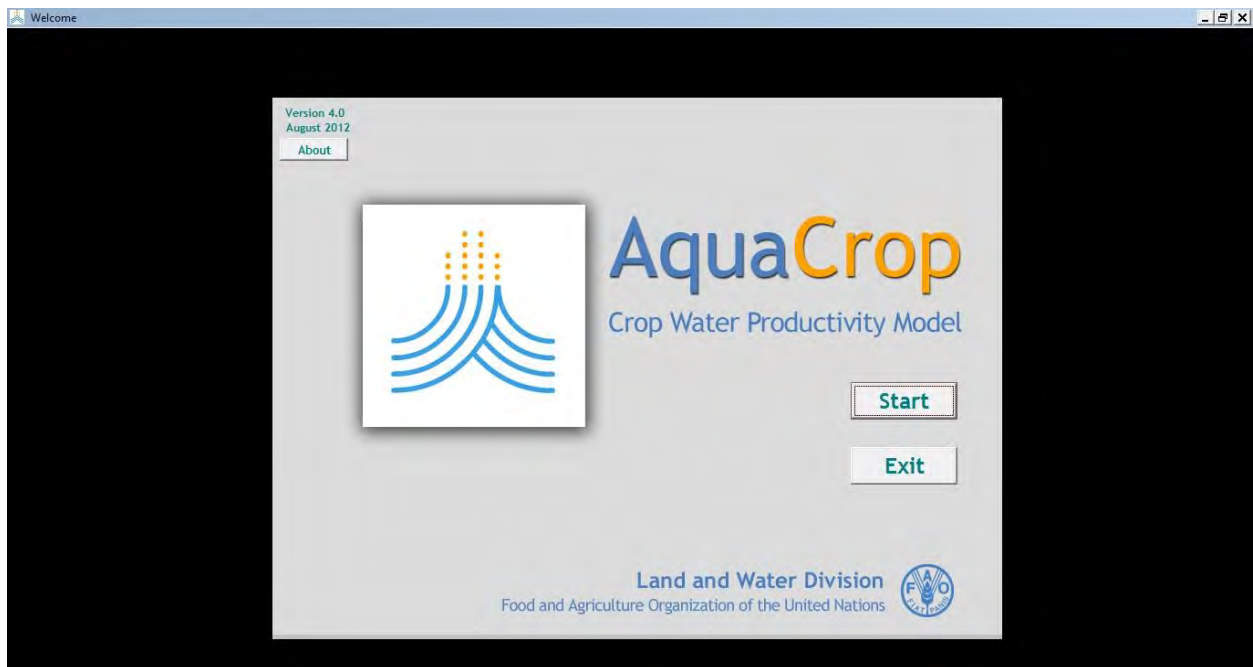


Figura E.1 Pantalla de inicio del software AquaCrop.

A partir de su liberación en 2009, ha sufrido constantes mejoras a través de nuevas versiones (incorporación de escenarios de cambio climático en el apartado de clima) así como la adición de nuevos cultivos para simular el rendimiento bajo la interacción con las condiciones climáticas, edáficas e hídricas de una determinada región (**Tabla E.1**).

Tabla E.1 Mejoras y adición de nuevos cultivos del modelo AquaCrop a partir de su liberación.

Versión 1.0 (2009)	Versión 3.1 (2011)	Versión 4.0 (2012)
Algodón	Algodón	Algodón
Arroz	Arroz con cascara	Arroz con cascara
Maíz	Girasol	Caña de azúcar
Papa	Maíz	Cebada
Quínoa	Papa	Girasol
Remolacha	Quínoa	Maíz
Soya	Remolacha	Papa
Trigo	Soya	Quínoa
	Tomate rojo (jitomate)	Remolacha
	Trigo	Soya
		Tomate rojo (jitomate)
		Trigo

Para estimar los resultados de rendimiento (grano y biomasa), requerimientos hídricos, comportamiento del cultivo, etc.; el modelo AquaCrop está integrado por varias ecuaciones que permiten expresar de manera simple dichos resultados una vez simulado el cultivo de interés y contando con información del cultivo (parámetros básicos), climática, edáfica e hídrica (en determinado caso se pueden generar calendarios de riego o actualizar el calendario si la aplicación en campo es diferente a la generada por el modelo AquaCrop). Por lo tanto, el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que con datos de clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo (**Figura E.2**).

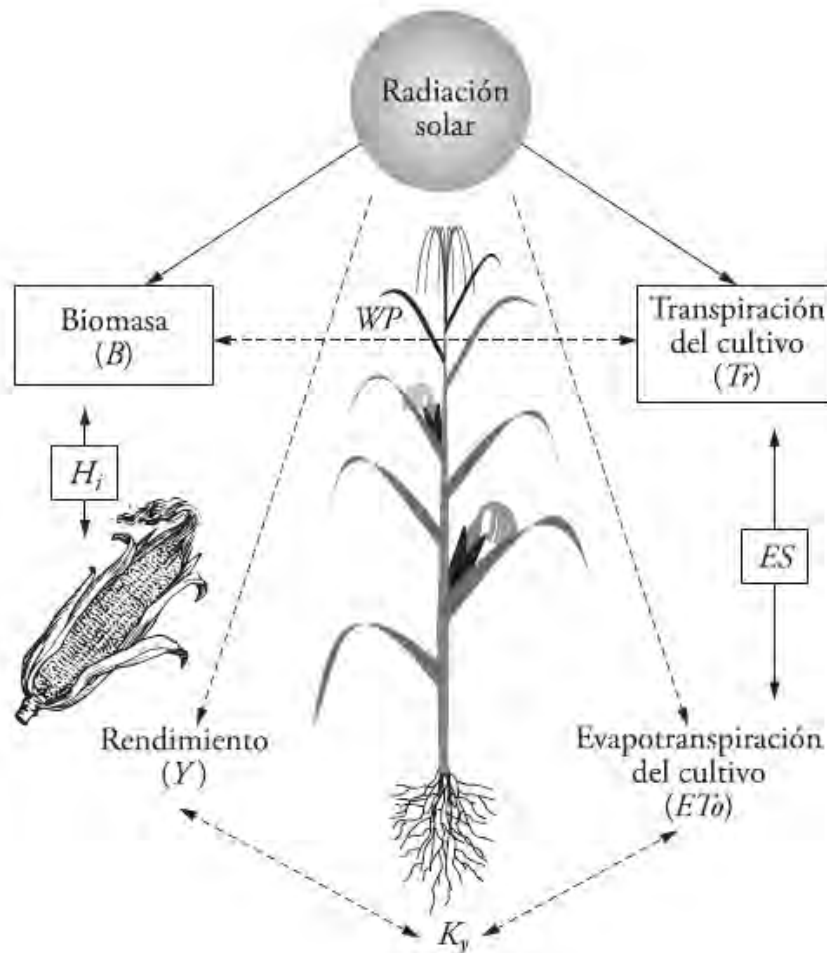


Figura E.2 Operación y lógica en la simulación con el modelo AquaCrop, con la separación de la evaporación del suelo (ES), transpiración (Tr), rendimiento (Y), biomasa (B) e índice de cosecha (Hi). WP : productividad del agua y Ky : factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptado de Raes *et al.*, 2009a por Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

El modelo AquaCrop requiere la siguiente información meteorológica diaria, decenal o mensual: temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ET_0); además, considera una concentración media anual de CO_2 en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000, según las mediciones del observatorio en Mauna Loa, Hawai. A partir de la versión 3.1 se adhirió al modelo AquaCrop cuatro escenarios de cambio climático: A1B, A2, B1 y B2. Los valores de la concentración de este gas pueden substituirse con las de las emisiones actuales (Raes *et al.*, 2009b). La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo, como conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha. La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) es la ecuación (E.1):

$$Y = B * H_i \quad (E.1)$$

En donde B es la biomasa del cultivo y H_i es el índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo.

En la simulación del desarrollo del cultivo se genera la posible respuesta al estrés térmico que pueda presentarse de acuerdo a las condiciones climáticas durante su ciclo de desarrollo, el cual se estima de acuerdo con las condiciones de clima a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal y, 3) cierre estomático. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa cuando se alcanzan límites establecidos para la humedad del suelo. Según Heng *et al.* (2009) y Raes *et al.*, (2009b), el modelo AquaCrop es una herramienta viable para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo, por lo que es útil para planear y evaluar estrategias bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra. El modelo AquaCrop estima el requerimiento hídrico del cultivo mediante un balance de humedad en el suelo con la ecuación E.2.

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R + P) + ES + Tr \quad (E.2)$$

En donde θ es la variable dependiente, i es la profundidad a regar (punto inicial del cálculo) y j es el contenido de humedad actualizado al momento del siguiente riego (contenido de humedad actualizado al momento del siguiente riego), D es el drenaje por percolación profunda, $R+P$ son el riego más la precipitación, ES es la evaporación del suelo y Tr es la transpiración del cultivo.

El modelo AquaCrop simula el crecimiento del dosel vegetal asumiendo dos casos para el crecimiento tipo exponencial que se presenta para la condición $CC \leq CC_x/2$ utilizando la ecuación E.3 y la senescencia exponencial para la condición $CC > CC_x/2$ utilizando la ecuación E.4.

$$CC = CC_o e^{tCGC} \quad \text{para } CC \leq \frac{CC_x}{2} \quad (E.3)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \quad \text{para } CC > \frac{CC_x}{2} \quad (E.4)$$

En donde CC es la cobertura del dosel vegetal al tiempo (t) transcurrido (expresado en días o grado día desarrollo), CC_o es la cobertura inicial del dosel ($t=0$),

CCx es la máxima cobertura del dosel vegetal, CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo para el cultivo considerado. El modelo AquaCrop ajusta el crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha⁻¹). En virtud que se carece de información experimental de cobertura vegetal requerida por el AquaCrop, es posible estimarla a partir de datos índice de área foliar (IAF), para el caso del maíz el AquaCrop tiene implementada la siguiente ecuación:

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (E.5)$$

El cálculo de los grados día (°D) a nivel diario se realiza usando la ecuación E.6.

$$\begin{aligned} \text{°D} &= T_a - T_{c-min}, T_a > T_{c-min} \\ \text{°D} &= 0, T_a \leq T_{c-min} \end{aligned} \quad (E.6)$$

La temperatura promedio T_a se estimó de acuerdo al método 3 del AquaCrop dada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-max} \\ T_a &= \frac{T_{c-max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-max} \\ T_a &= \frac{T_{c-min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-min} \end{aligned} \quad (E.7)$$

Donde T_{c-min} y T_{c-max} son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual la planta se desarrolla. T_x y T_n son las temperaturas máxima y mínima del día registradas en una estación meteorológica. Una descripción más detallada del concepto de días grado se presenta en el anexo B de este libro.

E.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El modelo AquaCrop fue desarrollado e implantado en un software computacional de libre acceso que se descarga del sitio web (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Una vez instalado el modelo AquaCrop en un sistema computacional, se pueden realizar las simulaciones del cultivo de interés, el cual se puede seleccionar del catálogo del software y el cual contiene una base de datos conformada por experimentos realizados en diferentes regiones del mundo para obtener información de los diferentes cultivos (**Figura E.3**).

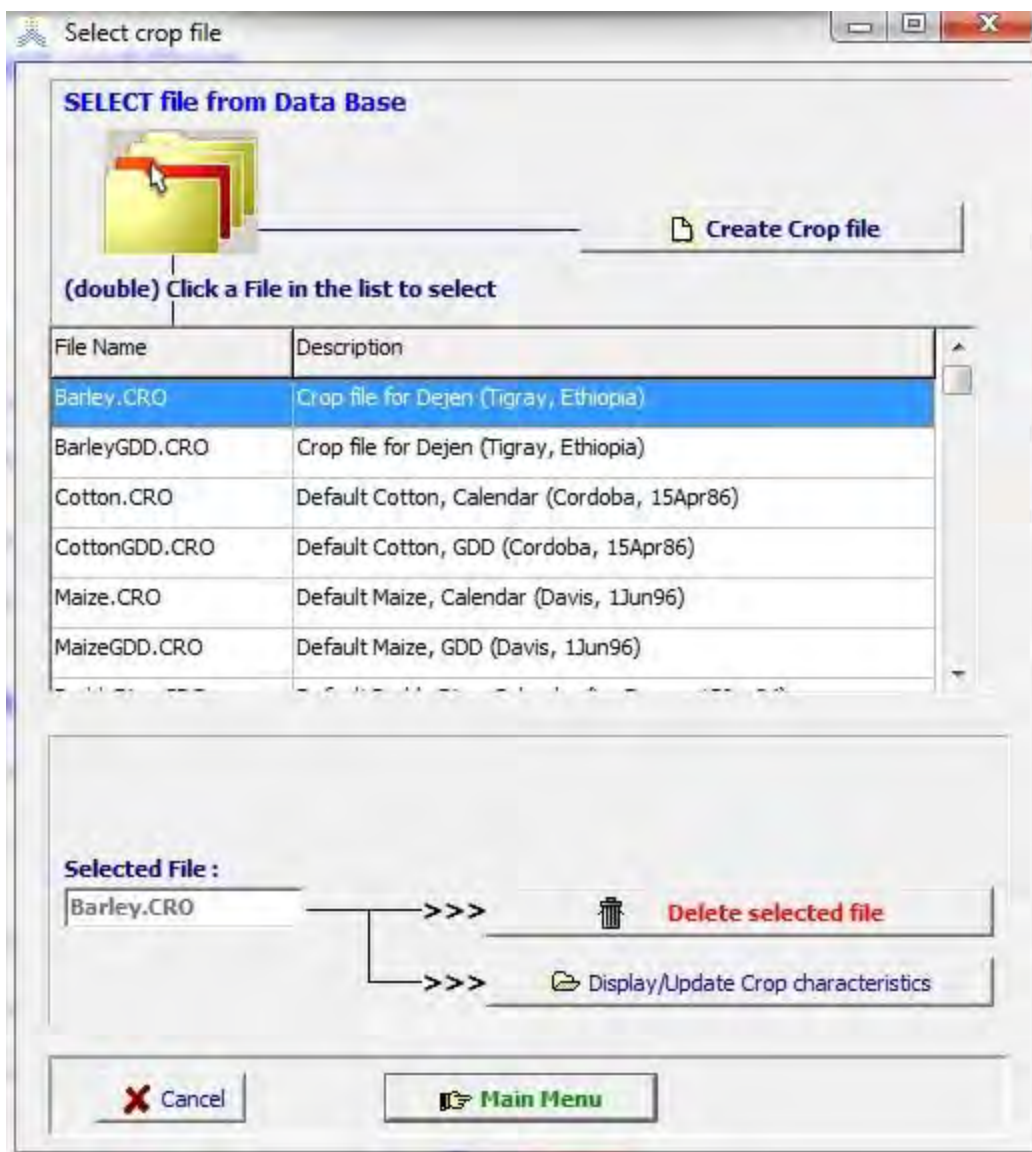


Figura E.3 Catálogo de cultivos integrados en el software del modelo AquaCrop.

Aunque se considera que los parámetros pueden utilizarse para cualquier región del mundo, el software facilita la modificación de los parámetros para calibrarlos localmente a la región donde se desea simular el rendimiento del cultivo. El proceso de calibración debe ser un ajuste fino de ciertos parámetros del modelo para obtener una alta correlación entre los valores experimentales y los simulados para la localidad de interés (Hussein *et al.*, 2011).

Para simular el rendimiento del cultivo, se debe tener adicionalmente información de clima, manejo agronómico (riego) y suelo (información edáfica) para complementar adecuadamente la simulación del cultivo por el modelo AquaCrop (Figura E.4).

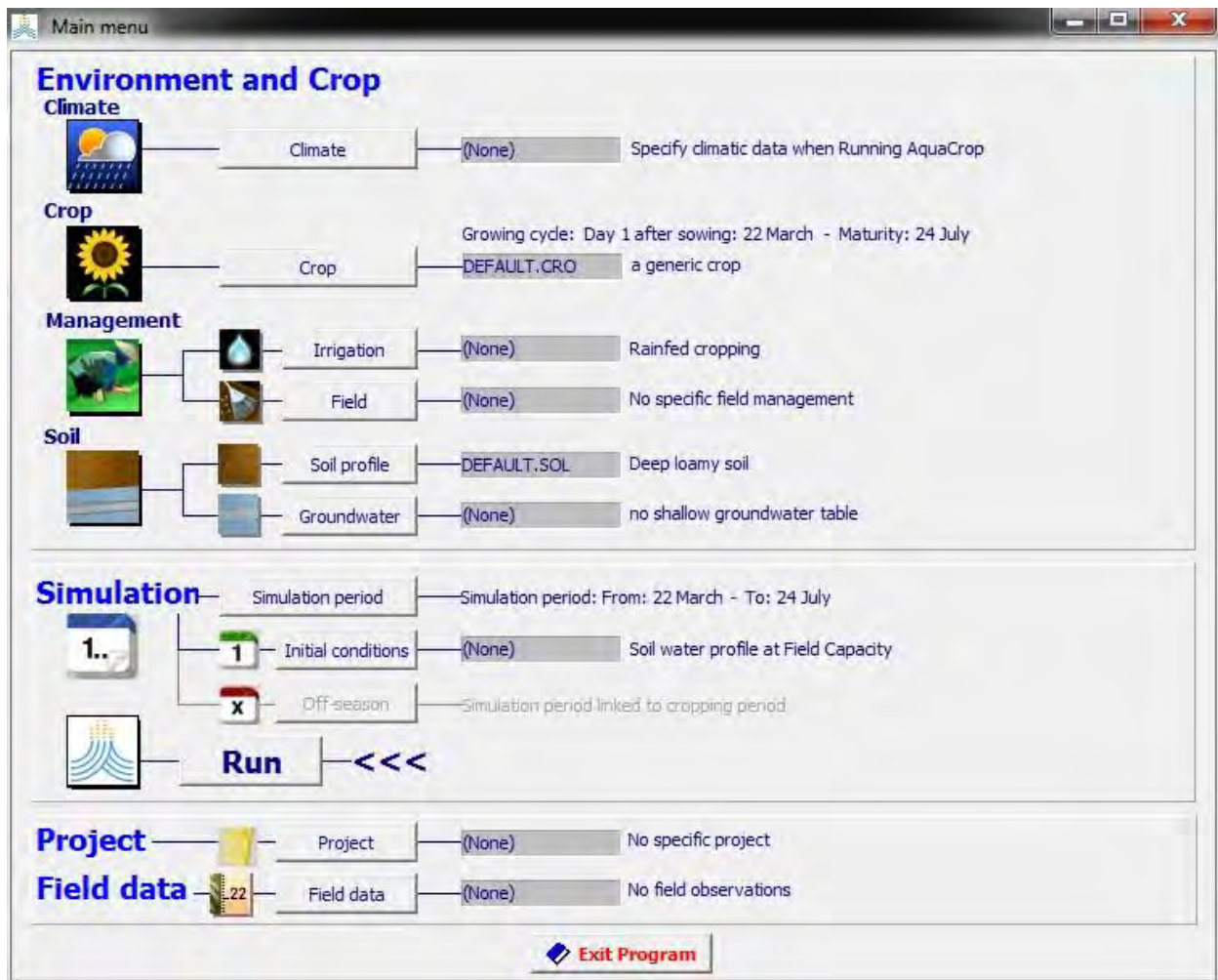


Figura E.4 Interface para introducir la información de las diferentes variables requeridas para simular el rendimiento del cultivo en AquaCrop.

Para la generación de calendarios de riego, se debe seleccionar la parte de riego en la interface del para introducir la información de las vribales para simular el rendimiento de determinado cultivo con el modelo AquaCrop; posteriormente se puede seleccionar la modalidad de agricultura, ya sea temporal o riego, dentro de esta última se pueden seleccionar varias opciones como generar calendarios de riego, establecer un calendario de riego y determinar los requerimientos hídricos según sea el interés de la simulación (**Figura E.5**).



Figura E.5 Selección de la modalidad agrícola: riego o temporal.

Dentro de las múltiples opciones y bondades del software, está la selección del sistema de riego a utilizar en la simulación: 1) aspersion, 2) riego por gravedad: melgas, bordos y surcos (Figura E.6).



Figura E.6 Selección del sistema de riego a utilizar en la simulación del cultivo.

Como parte de la generación de los calendarios de riego, se pueden visualizar los datos generados como parte de la simulación del modelo AquaCrop para ajustar los intervalos entre riegos, lámina de riego neta y aplicada para precisar la simulación generada inicialmente con respecto a lo realizado en campo, con la importante finalidad de obtener mejores beneficios en la parcela: eficiencia de aplicación, productividad en el uso del agua y ajustar los parámetros del cultivo así como de las diferentes variables que dependen del manejo agronómico como son el riego, fertilidad y tipo de suelo para generar una mejor simulación del rendimiento con respecto al manejo real del cultivo. En la **Figura E.7** se muestra un ejemplo del calendario de riego que se puede generar con el modelo AquaCrop.

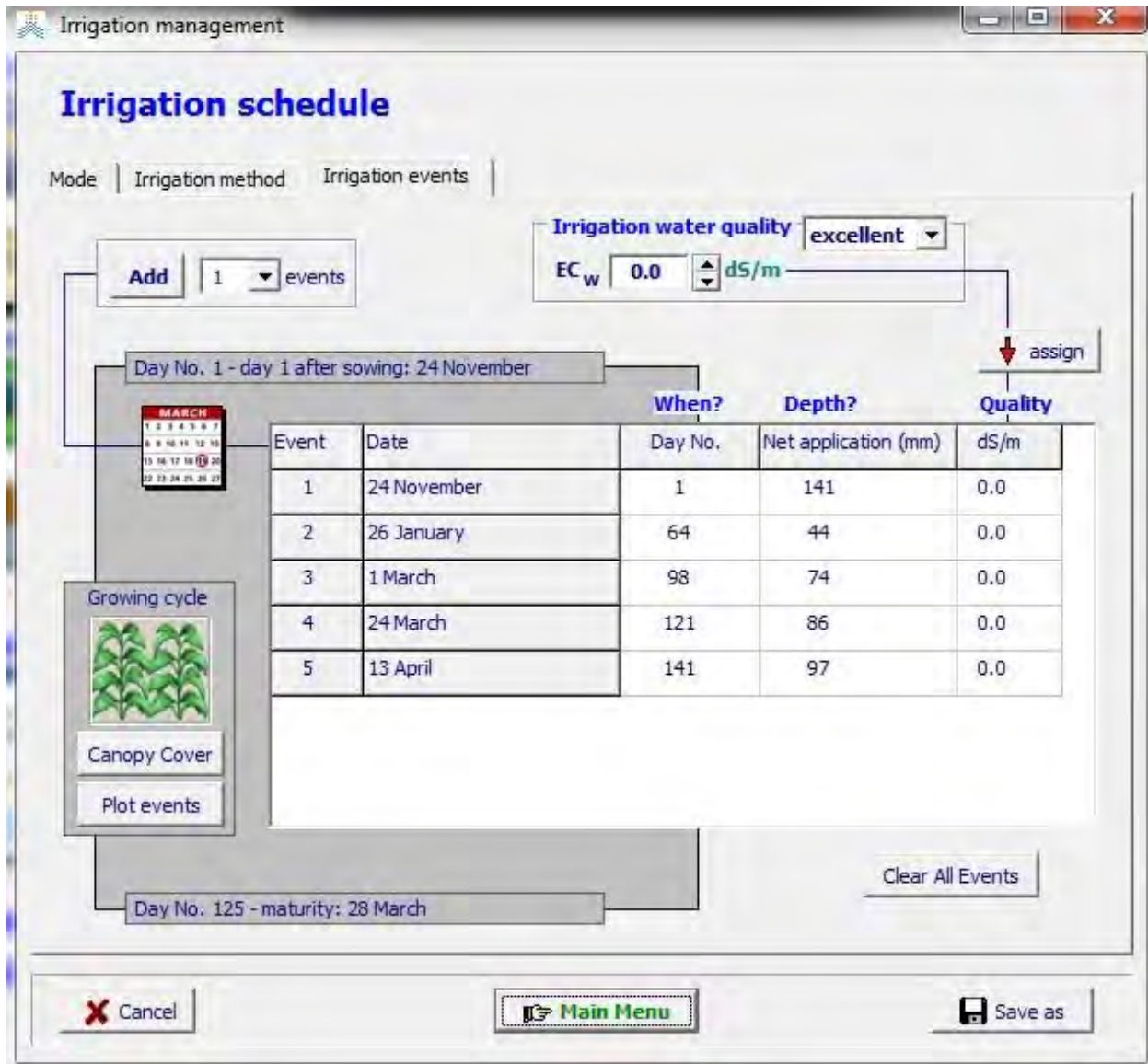


Figura E.7 Visualización del calendario de riego simulado con respecto al cultivo (duración del ciclo del cultivo, clima, suelo, sistema de riego, densidad de población) con el modelo AquaCrop.

E.4. EJEMPLO DE APLICACION PARA MAÍZ

En este apartado se presenta un ejemplo de aplicación para maíz cultivado en el norte de Sinaloa, México. Se describen los parámetros utilizados para simular el crecimiento y rendimiento del cultivo bajo diferentes ciclos agrícolas y variedades de maíz. Aunque el maíz puede sobrevivir temperaturas adversas en el rango de 0 °C a 45 °C, las temperaturas de desarrollo del maíz que asume el AquaCrop para estimar los °D, son de 8 °C y 30 °C, para T_{c-max} y T_{c-min} , respectivamente pero debido a que la zona de estudio es árida, se modificaron de 10 °C y 30 °C, para T_{c-max} y T_{c-min} , respectivamente.

Para la simulación del crecimiento del cultivo de maíz se utilizaron los parámetros conservativos o constantes del modelo AquaCrop que fueron obtenidos a partir de experimentos de maíz realizados en España y Estados Unidos (**Tabla E.2**), dichos parámetros son aplicables para un amplio rango de condiciones climáticas y no dependen específicamente de la variedad o híbrido utilizado en los experimentos de Heng *et al.* (2009); Hsiao *et al.* (2009).

Tabla E.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop.

Descripción	Valor	Unidad o medida
Temperatura base	10	°C
Temperatura máxima	30	°C
Dosel vegetal al 90% emergido (CC_0)	6.5	cm ²
Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)	1.3%	Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D)
Máximo dosel vegetal (CC_x)	-	En función de la densidad de plantas
Coeficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal = 100%	1.03	Transpiración completa del dosel relativo a la ETo
Coeficiente de declinación del cultivo antes de CC_x	0.3%	Declinación por día de las hojas envejecidas
Coeficiente de declinación (CGC) hasta senescencia	1.06%	Decremento del CC relativo a CC_x por °D
Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000	33.7	g (biomasa) m ⁻² , en función del CO ₂ atmosférico
Umbral de crecimiento de hoja p-alto	0.14	Como fracción del agua total disponible (TAW), sobre este crecimiento de hoja es inhibido
Umbral de crecimiento de hoja p-bajo	0.72	El crecimiento de la hoja se detiene completamente a este p
Coeficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de curva	2.9	Curva moderadamente convexa
Umbral de conductancia estomatal p-alto	0.69	Sobre esto, los estomas empiezan a cerrarse
Coeficiente de estrés de los estomas para la formación de la curva	6.0	Curva altamente convexa
Coeficiente de estrés de senescencia p-alto	0.69	Sobre esto, la senescencia del dosel inicia más rápido
Coeficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva	2.7	Curva moderadamente convexa
Índice de cosecha (Hi) como referencia	48%	Común para buena condiciones
°D desde el 90% de emergencia al inicio de la antesis	800	Puede ser menor para cultivos de ciclo corto
Duración de la antesis en °D	190	-
Coeficiente de inhibición del crecimiento de las hojas con respecto al Hi	7.0	Hi aumentado por inhibición del crecimiento de las hojas en la antesis
Coeficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi	3.0	Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis
°D totales desde emergencia a maduración	1510-1840	Menos para cultivos de ciclo corto

Los parámetros utilizados en el modelo AquaCrop fueron los parámetros de entrada (densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, temperaturas umbrales, método para calcular los grados día y expansión inicial del

dosel vegetal) utilizando datos del experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) y datos de parcelas comerciales de maíz para los ciclos agrícolas O-I y P-V posteriores así como las variedades, densidades de población y condiciones de manejo hídrico (**Tabla E.3**).

Tabla E.3 Datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V (2007-2008 y 2008-2009).

Parcela Año	Ciclo agrícola	Superficie (ha)	Fecha de siembra	Variedad	Densidad de población (plantas ha ⁻¹)
Exp. 03-04	O-I	40	24-nov	Pionner 30G54	95,000
Parcela 07-08	O-I	10	14-dic	Bisonte	133,333
Parcela 08-09	O-I	20	05-dic	Cebú	106,666
Parcela 2008	P-V	10	25-feb	Bisonte	100,000
Parcela 2009	P-V	10	29-feb	Pantera	93,333

Exp.= experimental.

Tal y como se muestra en la **Tabla E.4**, los resultados indican que las predicciones del rendimiento de grano del modelo son buenas con respecto a los datos medidos en campo (rendimiento de grano y biomasa).

Tabla E.4 Resultados medidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop.

Parcela	Datos observados en campo				Simulación con el modelo AquaCrop			
	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)
Exp. 03-04	179	1451.1	26.2	10.7	168	1814	26.6	10.87
07-08	177	1648	20.9	10.0	149	1887	24.2	11.6
08-09	181	1682	25.1	12.0	154	1967	25.3	12.1
2008	135	1199	22.4	9.6	127	1820	23.8	10.2
2009	133	1175	18.8	9.0	117	1648	19.6	9.4

°D= Grados día; Rend.= Rendimiento; Exp.= Experimental.

Considerando los datos agronómicos de calibración y validación, se realizaron simulaciones bajo las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica para obtener los rendimientos en el cultivo de maíz con respecto a la densidad de población, fechas de siembra en los ciclos agrícolas O-I y P-V (**Figura E.8**).

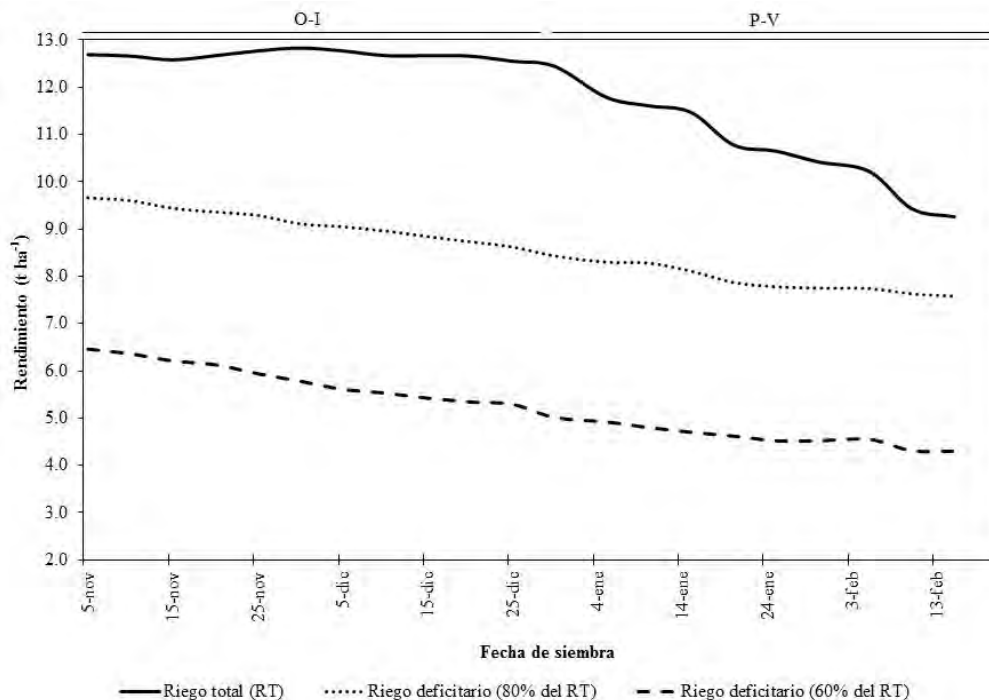


Figura E.8 Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (O-I y P-V).

De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2011), se puede observar que el rendimiento promedio registrado de maíz para la agricultura de riego en el norte de Sinaloa se encuentra dentro del rango simulado por el modelo AquaCrop pero faltan acciones para mejorar la productividad del cultivo y alcanzar un rendimiento superior como el simulado con la condición de disponibilidad hídrica de riego total (RT).

Una de las características que define la producción del cultivo, es la cantidad de biomasa generada durante su ciclo de crecimiento porque esta define el grado de trabajo de la planta para producir su alimento y producción final. El desarrollo del dosel vegetal simulado con el modelo AquaCrop para una misma fecha de siembra (05 de noviembre) considerando las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica propuestas en el presente estudio en el ciclo agrícola O-I y P-V generan respuestas diferentes a las condiciones hídricas (**Figura E.9**).

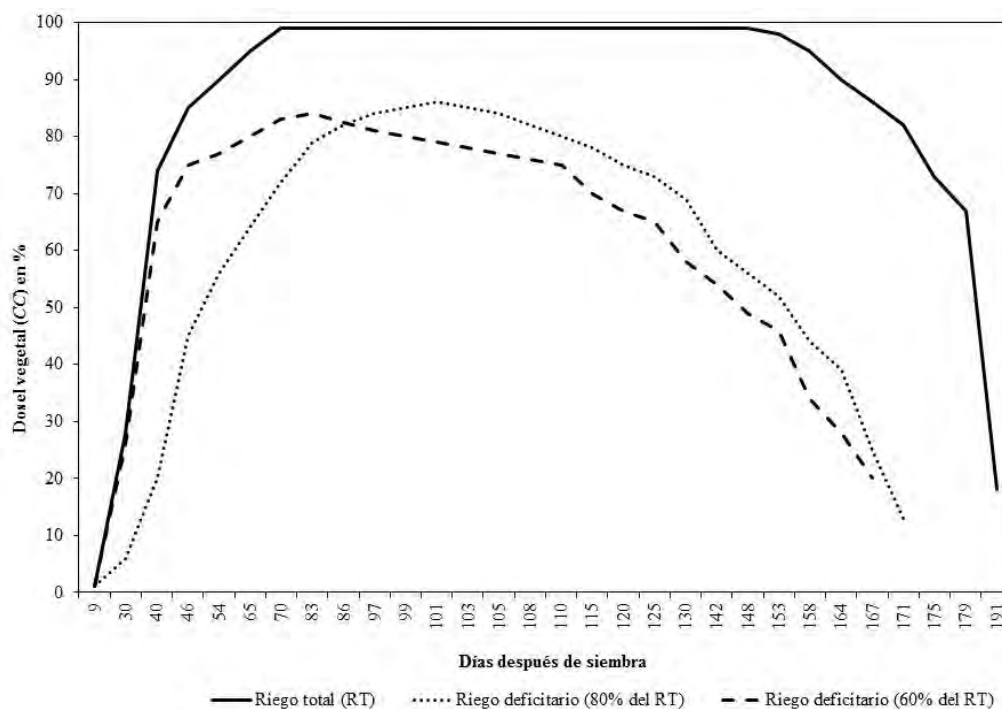


Figura E.9 Simulación del dosel vegetal (CC) en porcentaje para la fecha de siembra del 05 de noviembre (ciclo agrícola O-I) bajo las tres condiciones de disponibilidad hídrica.

También se simularon los requerimientos hídricos de maíz para las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica en diferentes fechas de siembra durante los ciclos agrícolas (O-I y P-V) típicos en que se establece el cultivo de maíz (**Tabla E.4**).

Tabla E.4 Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos O-I y P-V de acuerdo a las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y fecha de siembra.

Fecha de siembra	Riego total	Riego deficitario	Riego deficitario
	(RT)	(80 % del RT)	(60 % del RT)
mm			
05-nov	482.3	436.8	373.3
15-nov	471.1	441.6	379.9
30-nov	473.1	444.7	384.0
05-dic	474.2	432.5	375.1
15-dic	474.4	427.2	371.5
30-dic	463.1	419.4	364.0
05-ene	494.0	449.0	397.4
15-ene	481.2	435.2	378.0
30-ene	474.5	429.7	374.3
05-feb	439.9	390.9	336.5
15-feb	410.3	360.6	318.0

Los resultados obtenidos en la duración del ciclo del cultivo de maíz (**Figura E.10**) muestran que el modelo tiene una alta precisión en la simulación del crecimiento del cultivo bajo las diferentes condiciones de disponibilidad de agua y fechas de siembra, lo

cual genera una gran certidumbre para las condiciones climáticas contrastantes que se presentan en el norte de Sinaloa. De acuerdo con los resultados obtenidos en campo, la duración del ciclo está por debajo de los simulados debido a que se consideró un clima promedio de la zona y además, no se consideró en las simulaciones un estrés térmico y de fertilización, lo cual genera condiciones más propicias para la duración del cultivo pero se muestra una reducción del ciclo en las fechas de siembra correspondientes al período más caliente de la temporada agrícola.

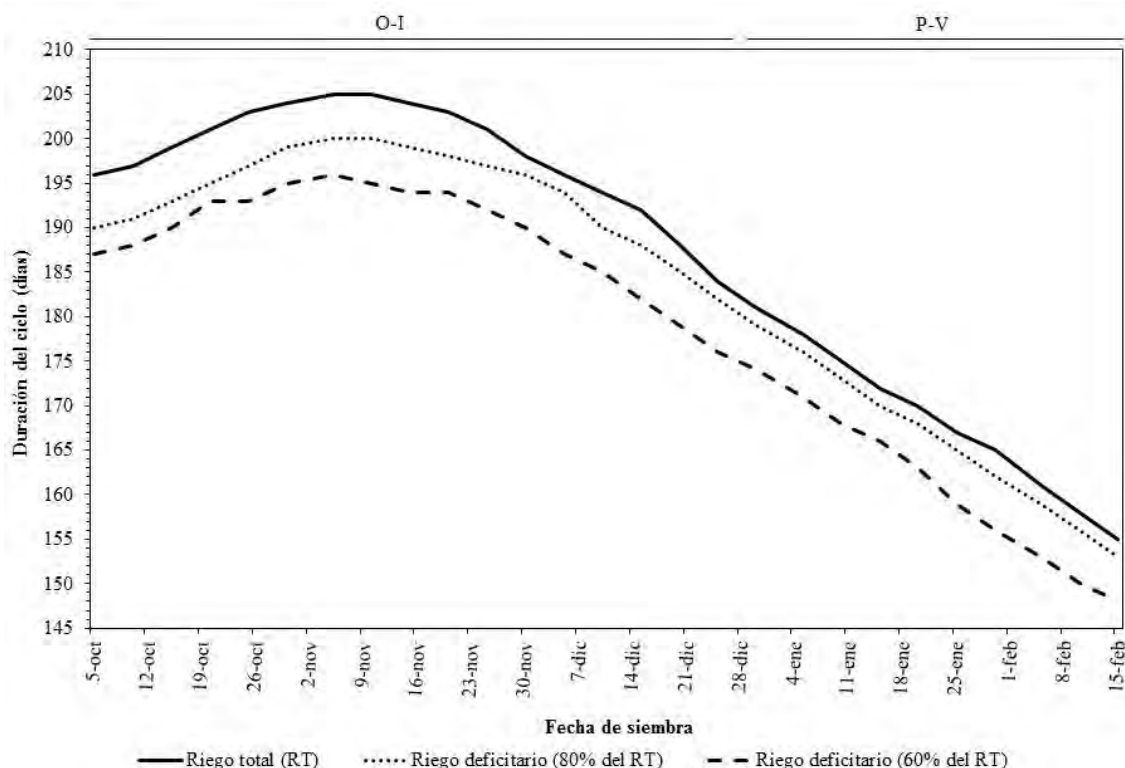


Figura E.10 Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a las tres condiciones de disponibilidad hídrica y fechas de siembra (ciclos O-I y P-V).

Para el uso del modelo AquaCrop, solo se requiere de la calibración de los parámetros de entrada por el usuario, ya que se definieron las T_{c-min} y T_{c-max} de 10 a 30 °C, respectivamente y solo se utilizaron 4 de las variedades más utilizadas en la zona de estudio para diferentes ciclos agrícolas y por lo cual se requieren los datos del resto de variedades a utilizar. De acuerdo con las simulaciones realizadas por el modelo, el período de fechas óptimo está comprendido desde el 05 de noviembre hasta el 15 de enero de acuerdo a la duración del ciclo del cultivo y rendimientos potenciales. Los análisis estadísticos muestran un gran desempeño del modelo para las condiciones predominantes del norte de Sinaloa, y por lo tanto, se debería aplicar a otras regiones maiceras del estado y del país para ofrecer alternativas de manejo a los productores con la posibilidad de mejorar la toma de decisiones.

E.5 LITERATURA CONSULTADA

- Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke and J. M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal*. 92: 679-690.
- Flores-Gallardo, H. 2010. Impacto del cambio climático en los distritos de riego de Sinaloa. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados - Programa de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, estado de México. 189 p.
- Flores-Gallardo, H., E. Sifuentes-Ibarra, H. Flores-Magdaleno, W. Ojeda-Bustamante y C. R. Ramos-García. 2014. Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(2): 241-252.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz y E. Sifuentes-Ibarra. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*. 30(1): 59-67.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra y E. Mejía-Sáenz. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*. 47(4): 347-359.
- Flores-Magdaleno, H., H. Flores-Gallardo y W. Ojeda-Bustamante. 2014. Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 37(2): 149-157.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 488-498.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijssman, G. Y. Tsuji and J. Koo. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hsiao, T. C., L. K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 448-459.
- Hussein, F., M. Janat and A. Yakoub. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 9(4): 1319-1330.
- Jones, C. A., J. R. Kiniry, P. T. Dyke, D. B. Farmer and D. C. Godwin. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station. 194 p.

- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal Agronomy*. 18: 235-265.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn and C. J. Smith. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal Agronomy*. 18: 267-288.
- Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*. 88(5): 695-697.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40(1): 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, A. Rojano-Aguilar y M. Iñiguez-Covarrubias. 2012. Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *In*: P. F. Martínez-Austria y C. Patiño-Gómez (eds.). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México*. Vol. IV. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp: 71-119.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009a. AquaCrop. Reference Manual. FAO, Rome, Italy. 218 p.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009b. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101(3): 438-447.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101(3): 426-437.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal Agronomy*. 18: 289-307.
- Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*. 87: 131-154.

