

**PROYECTO**

**“TECNOLOGÍAS PARA EL USO RACIONAL Y  
EFICIENTE DEL RIEGO PARCELARIO”**

**RD-1109.1**

**Informe final**

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE  
SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE RIEGO

M.C. Pedro Pacheco Hernández  
M.C. Juan Manuel Ángeles Hernández  
M.C. Efrén Peña Peña  
Ing. Armando de los Santos García  
M.C. Juan Carlos Herrera Ponce

México, 2011

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DE RIEGO PARA UN CULTIVO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO.....</b>	<b>1</b>
1.1. DIAGNÓSTICO Y SELECCIÓN DEL INVERNADERO .....	1
1.1.1. <i>Antecedentes</i> .....	1
1.1.2. <i>Actividades</i> .....	2
1.1.2.1. Selección del productor y módulo de invernadero.....	2
1.1.2.2. Caracterización del invernadero.....	2
1.1.2.3. Análisis del tipo de suelo .....	4
1.1.2.4. Instalación de estación meteorológica .....	5
1.2. SEGUIMIENTO DEL CULTIVO, REGISTRO Y ANÁLISIS DE VARIABLES EN EL INVERNADERO .....	11
1.2.1. <i>Registro de datos climatológicos</i> .....	11
1.2.2. <i>Evaluación hidráulica del sistema de riego del invernadero</i> .....	14
1.2.3. <i>Caracterización fisicoquímica del suelo</i> .....	18
1.2.4. <i>Análisis de datos climatológicos</i> .....	20
1.2.5. <i>Evaluación hidráulica del sistema de riego del invernadero</i> .....	25
1.2.6. <i>Volumen de agua consumido</i> .....	26
1.2.7. <i>Costos de producción e ingresos por cosecha</i> .....	28
1.2.8. <i>Productividad del agua</i> .....	28
1.2.9. <i>Conclusiones y Recomendaciones</i> .....	29
<b>2. PARCELA EXPERIMENTAL SOBRE LA TÉCNICA DE SURCOS ALTERNOS DE RIEGO PARCELARIO .....</b>	<b>33</b>
2.1. INSTALACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL CON SURCOS ALTERNOS.....	33
2.1.1. <i>Revisión Bibliográfica</i> .....	33
2.1.2. <i>Materiales y método</i> .....	35
2.1.2.1. Descripción del sitio de estudio.....	35
2.1.2.2. Diseño experimental .....	36
2.1.2.3. Variables medidas de riego.....	37
2.1.2.4. Análisis estadísticos.....	38
2.1.3. <i>Resultados</i> .....	38
2.1.3.1. Comportamiento de las variables climáticas durante el periodo de estudio.....	38
2.1.3.2. Aplicación de agua en los tratamientos de riego.....	39
2.1.3.3. Lámina de riego aplicado por tratamientos .....	39
2.1.3.4. Distribución de humedad en el suelo por tratamiento .....	40
2.1.3.5. Curvas de avance y recesión por tratamiento .....	41
2.1.3.6. Análisis de las variables respuesta del cultivo .....	43
2.1.4. <i>Conclusiones</i> .....	44
2.2. ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA CON SURCOS ALTERNOS .....	45
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE CULTIVOS MEJORADOS GENÉTICAMENTE PARA RESISTIR EL DÉFICIT HÍDRICO... 47</b>	<b>47</b>
3.1. HERENCIA DE LOS CARACTERES ADQUIRIDOS.....	50
3.1.1. <i>Variación</i> .....	51
3.1.2. <i>La lucha por la existencia</i> .....	51
3.1.3. <i>Selección Natural</i> .....	51
3.1.4. <i>Polinización cruzada y autopolinización</i> .....	52
3.1.5. <i>Evolución y Adaptación</i> .....	53
3.1.6. <i>Aislamiento reproductor</i> .....	54
3.1.7. <i>Hibridación</i> .....	55

3.1.8. Poliploides .....	55
3.1.9. Importancia del mejoramiento vegetal.....	55
3.2. BIOTECNOLOGÍA .....	57
3.2.1. Germoplasma .....	59
3.2.2. Variabilidad genética .....	59
3.3 MÉTODOS DE SELECCIÓN ARTIFICIAL EN PLANTAS.....	61
3.3.1. Selección masal.....	61
3.3.2. Selección individual en poblaciones locales de plantas autopolinizadas.....	62
3.3.3. Selección de plantas de autopolinización formada en la Hibridación .....	63
3.3.4. Método pedigree .....	63
3.3.5. Cruza de dos progenitores.....	63
3.3.6. Cruza de tres progenitores .....	64
3.3.7. Cruza de cuatro progenitores .....	64
3.3.8. Retrocruza .....	65
3.3.9. Interacción genotipo ambiente.....	66
3.4. PRINCIPALES TIPOS DE CULTIVARES .....	66
3.4.1. Variedades clonales .....	66
3.4.2. Líneas .....	66
3.4.3. Variedades sintéticas .....	66
3.4.4. Compuestos.....	66
3.4.5. Multilíneas.....	66
3.4.7. Transgénico .....	67
3.5. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE TRANSGÉNICOS.....	68
3.5.1. Transformación por protoplastos .....	68
3.5.2. Transformación por electroporación.....	69
3.5.3. Transformación por bombardeo .....	69
3.5.4. Transformación mediada por Agrobacterium .....	70
3.5.5. Métodos alternativos de transformación .....	72
3.6. MUTACIONES.....	72
3.6.1. Efectos de la mutación génica sobre el fenotipo.....	73
3.6.2. Mutantes letales condicionales.....	73
3.6.3. Mutantes para la fuente de carbono y los factores de crecimiento.....	73
3.6.4. Mutantes resistentes a fagos y a agentes químicos.....	74
3.6.5. Alteraciones antígenas.....	74
3.7. EL OBJETIVO DEL MEJORAMIENTO VEGETAL .....	75
3.7.1. Resistencia a plagas.....	75
3.7.2. Control de enfermedades virales .....	76
3.7.3. Mejora del rendimiento.....	77
3.7.4. Fijación de nitrógeno.....	77
3.7.5. Tolerancia al estrés biótico y abiótico .....	77
3.7.6. Uso de tierras marginales.....	78
3.7.7. Producción de frutos más resistentes.....	78
3.7.8. Beneficios en cuanto a nutrición .....	79
3.7.9. Menor impacto ambiental.....	79
3.7.10. Mejora con fines ornamentales .....	80
3.7.11. Producción de plantas bioreactoras.....	80
3.7.12. Otros beneficios de las plantas transgénicas.....	80
3.7.13. Fármacos y vacunas procedentes de plantas transgénicas .....	80
3.8. CULTIVO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS EN EL MUNDO .....	82
3.8.1. Producción.....	83

3.8.2. Situación de los cultivos transgénicos .....	83
3.8.3. Situación de los cultivos transgénicos en México .....	89
<b>3.9. SEQUÍA, UN RETO PARA LA AGRICULTURA.....</b>	<b>91</b>
3.9.1. Tipos de sequía .....	91
3.9.1.1. Sequía agrícola .....	91
3.9.1.2. Sequía hidrológica .....	91
3.9.2. La sequía en las plantas .....	91
3.9.3. Mejoramiento de cultivos ante condiciones de estrés hídrico .....	94
3.9.4. Mejoramiento asistido de cultivos a la tolerancia a sequía .....	95
3.9.5. Mecanismos de resistencia a la sequía .....	97
3.9.5.1. Escape.....	98
3.9.5.2. Evitación .....	98
3.9.5.3. Tolerancia .....	98
3.9.5.4. Recuperación .....	99
3.9.6. Los cultivos y la sequía .....	99
3.9.6.1. Maíz.....	99
3.9.6.2. Arroz.....	100
3.9.6.3. Sorgo .....	101
3.9.6.4. Trigo .....	102
3.9.6.5. Frijol .....	103
<b>4. ACTUALIZACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO PARCELARIO .....</b>	<b>105</b>
4.1. CONTENIDO DEL SISTEMA.....	105
4.1.1. Menú Principal .....	105
4.1.2. Sistema de Riego por Gravedad.....	106
4.1.3. Sistema de Riego por Goteo .....	109
<b>5. MANUAL PARA EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PRESURIZADO DE ALTA EFICIENCIA .....</b>	<b>115</b>
5.1. DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN .....	115
5.1.1. Antecedentes.....	115
5.1.1.1. Eficiencias global y parciales de riego .....	115
5.1.1.2. Eficiencia en riego por aspersión.....	116
5.1.1.3. Uniformidad de distribución en riego por aspersión .....	121
5.1.2. Método propuesto para calcular la eficiencia global de sistemas de riego por aspersión .....	123
5.1.2.1. Eficiencia, uniformidad y pérdidas de agua en el sistema de riego.....	123
5.1.2.2. Evaluaciones agronómica e hidráulica .....	124
5.1.2.3. Evaluación económica .....	125
5.1.2.4. Conocimientos necesarios para la evaluación de los sistemas de riego por aspersión .....	125
5.2. CONCEPTOS AGRONÓMICOS DE RIEGO POR ASPERSIÓN .....	126
5.2.1. Relaciones agua-suelo-riego por aspersión .....	126
5.2.1.1. Almacenamiento de agua en el suelo .....	126
5.2.1.1.1. Suelo saturado .....	126
5.2.1.1.2. Suelo a capacidad de campo.....	127
5.2.1.1.3. Suelo a marchitamiento permanente.....	128
5.2.1.1.4. Aireación dentro del suelo.....	130
5.2.1.2. Disponibilidad del agua.....	130
5.2.1.2.1. Humedad aprovechable total .....	131
5.2.1.2.2. Humedad fácilmente aprovechable .....	131
5.2.1.3. Movimiento del agua en el suelo .....	132
5.2.1.3.1. Infiltración del agua en el suelo en riego por aspersión .....	132
5.2.1.3.2. Infiltración acumulada.....	133
5.2.1.3.3. Velocidad de infiltración.....	134
5.2.1.4. Lámina de riego en aspersión.....	136

5.2.1.4.1. Lámina de agua .....	136
5.2.1.4.2. Lámina de agua aprovechable en los suelos .....	136
5.2.1.4.3. Láminas de riego neta y bruta .....	137
5.2.1.5. Aspersión y salinidad .....	138
5.2.1.6. Requerimiento de riego .....	141
5.2.1.7. Aportaciones del manto freático .....	142
<b>5.3. ESTADÍSTICA APLICADA AL RIEGO POR ASPERSIÓN .....</b>	<b>143</b>
5.3.1. Población, individuo y muestra .....	143
5.3.1.1. Población .....	143
5.3.1.2. Individuo .....	143
5.3.1.3. Muestra .....	144
5.3.2. Medida de tendencia central .....	144
5.3.2.1. Media .....	144
5.3.2.2. Media ponderada .....	144
5.3.2.3. Mediana .....	145
5.3.2.4. Moda .....	145
5.3.3. Medidas de dispersión .....	146
5.3.3.1. Rango .....	146
5.3.3.2. Varianza .....	146
5.3.3.3. Desviación típica o estándar .....	147
5.3.3.4. Coeficiente de variación .....	148
5.3.4. Distribución de frecuencias .....	148
5.3.4.1. Distribución de frecuencias simétrica .....	148
5.3.4.2. Distribución de frecuencias asimétrica .....	150
5.3.5. Ejemplos de estadística aplicada en aspersión .....	152
5.3.5.1. Ejemplo 1. Análisis estadístico de la lluvia de un aspersor operando individualmente y con traslapes de lluvia, generados con la precipitación del mismo aspersor .....	152
5.3.5.2. Ejemplo 2. Estudio estadístico de lluvia generada por una línea de aspersores .....	155
5.3.6. Muestreo .....	160
5.3.6.1. Objetivo del muestreo .....	160
5.3.6.2. Tamaño de muestra .....	161
5.3.6.3. Consideraciones generales .....	161
<b>5.4. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN .....</b>	<b>163</b>
5.4.1. Aspersores .....	163
5.4.1.1. Aspersores pequeños .....	163
5.4.1.2. Aspersores estándar .....	164
5.4.1.3. Aspersores gigantes .....	165
5.4.2. Tuberías .....	167
5.4.2.1. Tuberías regantes .....	167
5.4.2.2. Tuberías de conducción y distribución .....	168
5.4.3. Sección de riego .....	169
5.4.4. Equipos y accesorios hidráulicos .....	169
5.4.4.1. Válvulas .....	169
5.4.4.1.1. Válvula de retención .....	170
5.4.4.1.2. Válvula de alivio de presión .....	170
5.4.4.1.3. Válvulas de control .....	171
5.4.4.1.4. Válvulas de admisión y expulsión de aire .....	171
5.4.4.2. Medidores de gasto hidráulico .....	172
5.4.4.2.1. Medidores de presión diferencial .....	173
5.4.4.2.2. Medidores de gasto de placa de orificio .....	173
5.4.4.2.3. Medidores de gasto de propela y turbina .....	174
5.4.4.3. Medidor de presión .....	174
5.4.5. Sistema de bombeo .....	175
5.4.5.1. Unidad de bombeo .....	175

5.4.5.2. Subestación eléctrica.....	176
5.4.5.3. Obra de toma.....	177
5.5. LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.....	178
5.5.1. <i>Sistemas fijos</i> .....	178
5.5.2. <i>Sistemas semifijos</i> .....	179
5.5.3. <i>Sistemas móviles</i> .....	180
5.5.3.1. Sistemas portátiles de movimiento intermitente.....	180
5.5.3.1.1. Sistemas portátiles de movimiento manual.....	180
5.5.3.1.2. Sistemas portátiles de movimiento mecánico.....	182
5.5.3.2. Sistemas de movimiento continuo.....	184
5.5.3.2.1. Cañón viajero.....	184
5.5.3.2.2. Regante de pivote central.....	186
5.5.3.2.3. Tubería regante de movimiento frontal o avance frontal.....	186
5.6. EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.....	189
5.6.1. <i>Evaluación agronómica</i> .....	189
5.6.1.1. Productividad del agua.....	189
5.6.1.2. Eficiencia global del sistema de riego.....	191
5.6.1.3. Eficiencias parciales.....	192
5.6.1.3.1. Eficiencia de almacenamiento.....	193
5.6.1.3.2. Eficiencia de conducción.....	193
5.6.1.3.3. Eficiencia de aplicación.....	194
5.6.1.3.4. Tipos de expresiones de las eficiencias usadas en riego.....	195
5.6.1.4. Pérdidas de agua en el riego por aspersión.....	196
5.6.1.4.1. Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia.....	196
5.6.1.4.2. Pérdidas por arrastre y evaporación.....	197
5.6.1.4.3. Pérdidas por grado de uniformidad de distribución hidráulica.....	197
5.6.1.4.4. Pérdidas en la conducción.....	198
5.6.1.4.5. Pérdidas en el vaso.....	198
5.6.2. <i>Evaluación hidráulica</i> .....	199
5.6.2.1. Bases de hidráulica para lograr la uniformidad.....	199
5.6.2.1.1. Presiones y gastos de operación del sistema.....	199
5.6.2.1.2. Rango de gasto o presión de operación de aspersores.....	200
5.6.2.1.3. Análisis del funcionamiento de una tubería con aspersores.....	203
5.6.2.2. Evaluación de los sistemas de riego.....	212
5.6.2.2.1. Factores que afectan la uniformidad de riego del sistema.....	212
5.6.2.2.2. Evaluación del sistema con presiones y gastos de operación.....	213
5.6.2.2.3. Evaluación de la uniformidad de distribución hidráulica del sistema (UDH) o eficiencia de distribución hidráulica.....	217
5.6.2.2.4. Evaluación de la uniformidad de la lluvia.....	220
5.6.2.2.5. Evaluación global de la eficiencia.....	227
5.6.3. <i>Evaluación económica</i> .....	234
5.6.3.1. Costos del sistema de riego.....	235
5.6.3.2. Costos del cultivo, valor de la cosecha y relación beneficio-costos.....	238
5.6.4. <i>Procedimiento para evaluar un sistema de riego</i> .....	238
5.6.4.1. Proceso de evaluación.....	239
5.6.4.2. Planeación de una evaluación.....	239
5.6.4.3. Requerimientos generales para conocer el grado de desempeño.....	240
5.6.4.4. Objetivos y requisitos generales.....	241
5.6.4.5. Evaluación de campo.....	241
5.6.4.6. Dispositivos y materiales para la evaluación.....	242
5.6.4.7. Organización de la visita.....	244
5.6.4.8. Realizando una evaluación.....	244
5.6.4.9. Analizando datos de una evaluación.....	245
5.6.4.10. Preparando el reporte de una evaluación.....	246

5.6.5. Recomendaciones para el mejoramiento de sistemas de riego por aspersión .....	246
5.6.5.1. Bases de operación de un sistema de riego por aspersión.....	246
5.6.5.2. Indicadores de desempeño y acciones de mejora de un sistema de riego por aspersión.....	247
5.6.5.3. Recomendaciones generales de operación de un sistema de riego por aspersión.....	248
5.7. EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO .....	250
5.7.1. Ejemplo de evaluación agronómica en riego por aspersión tipo pivote.....	250
5.7.1.1. Información obtenida sobre el cultivo de caña .....	250
5.7.1.2. Productividad del suelo y del agua en el cultivo de caña .....	251
5.7.1.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia de la zona .....	252
5.7.1.4. Requerimiento de riego, tomando en cuenta la evapotranspiración del cultivo y la lluvia efectiva.....	253
5.7.1.5. Requerimiento de riego tomando en cuenta la salinidad.....	253
5.7.1.6. Ajuste de requerimiento de riego por aportación de manto freático.....	255
5.7.1.7. Eficiencias de riego.....	256
5.7.1.8. Pérdidas de agua.....	257
5.7.1.9. Recomendaciones.....	257
5.7.2. Ejemplo de evaluación hidráulica de un sistema de riego de pivote central.....	258
5.7.2.1. Decisión y objetivos de la evaluación .....	258
5.7.2.2. Planeación de la evaluación.....	258
5.7.2.3. Obtención de la información del predio .....	259
5.7.2.4. Análisis de documentos e información.....	260
5.7.2.5. Visita preliminar .....	260
5.7.2.6. Definición de parámetros de la evaluación.....	260
5.7.2.7. Prueba de uniformidad de lluvia .....	260
5.7.2.8. Recomendaciones.....	267
5.7.3. Ejemplo de evaluación de un sistema de riego por aspersión portátil manual.....	268
5.7.3.1. Decisión y objetivos de la evaluación .....	268
5.7.3.2. Planeación de la evaluación.....	268
5.7.3.3. Obtención de la información del predio .....	269
5.7.3.4. Análisis de documentos e información.....	270
5.7.3.5. Visita preliminar .....	270
5.7.3.6. Definición de parámetros de la evaluación.....	270
5.7.3.7. Trabajos desarrollados.....	271
5.7.3.7.1. Prueba de uniformidad de lluvia .....	271
5.7.3.7.2. Prueba de uniformidad de distribución hidráulica.....	277
5.7.3.7.3. Pérdidas por arrastre y evaporación .....	280
5.7.3.7.4. Análisis de la información de los trabajos de campo.....	281
5.7.3.7.5. Análisis de simulación de riego con traslape mejorado (9*9).....	282
5.7.3.7.6. Recomendaciones de mejora de acuerdo con la evaluación del sistema de riego.....	283
5.7.4. Ejemplo de cálculo de lámina de riego con datos de una evaluación en sistema de riego portátil manual .	284
5.7.4.1. Información recabada.....	285
5.7.4.2. Resultados de la evaluación.....	285
5.7.4.3. Cálculos y jerarquización de problemas.....	285
5.7.4.4. Recomendaciones.....	286
<b>6. MÓDULO PARA LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS BAJO AGRICULTURA URBANA .....</b>	<b>287</b>
6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	288
6.1.1. Agricultura urbana en el mundo.....	288
6.1.2. Recipientes y contenedores.....	289
6.1.3. Sustratos.....	290
6.1.4. Drenaje.....	290
6.1.5. Calidad del agua de riego.....	292
6.1.6. Plantación.....	293
6.1.7. Nutrición de las plantas.....	293

6.1.7.1. Solución nutritiva .....	294
<b>6.1.8. Plagas y enfermedades en cultivos hidropónicos.....</b>	<b>294</b>
6.1.8.1. Hongos.....	295
6.1.8.2. Bacterias .....	295
6.1.8.3. Virus .....	295
<b>6.2. MATERIALES Y MÉTODOS FÍSICOS.....</b>	<b>295</b>
6.2.1. <i>Materiales</i> .....	295
6.2.1.1. Árbol de producción.....	295
6.2.1.2. Cajoneras verticales.....	297
6.2.2. <i>Metodología</i> .....	299
6.2.2.1. Sustrato .....	299
6.2.2.2. Contenedores.....	301
6.2.2.3. Drenaje.....	302
6.2.2.4. Siembra .....	303
6.2.2.5. Trasplante.....	305
6.2.2.6. Riego.....	307
6.2.2.7. Fertilización.....	308
6.2.2.8. Plagas y enfermedades.....	311
6.2.2.9. Tutorio.....	315
6.2.2.10. Cosecha .....	316
6.2.2.11. Procesamiento .....	321
<b>6.3. RESULTADOS.....</b>	<b>322</b>
6.3.1. <i>Árbol de producción</i> .....	323
6.3.2. <i>Cajonera vertical de producción</i> .....	329
6.3.3. <i>Producción en general</i> .....	332
6.3.4. <i>Costos de producción</i> .....	333
6.3.5. <i>Rendimiento de los cultivos en "Raciones de consumo"</i> .....	336
<b>6.4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>337</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>339</b>

## 1. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DE RIEGO PARA UN CULTIVO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

### 1.1. DIAGNÓSTICO Y SELECCIÓN DEL INVERNADERO

#### 1.1.1. Antecedentes

El conocimiento de los requerimientos de riego de los cultivos facilita un mejor acoplamiento entre el riego y las demandas de agua de los cultivos ya que estas últimas pueden ser altas en los días de mayor insolación, con vientos fuertes o con baja humedad ambiental.

La evapotranspiración de los cultivos y la precipitación son los dos principales componentes para estimar los requerimientos de riego. Existen metodologías para medirlos o estimarlos. Por otro lado, también se han desarrollado sensores y sistemas de adquisición de datos, para monitorear el contenido hídrico del suelo o sustrato. Las estaciones meteorológicas proporcionan información de la variación horaria de las variables climatológicas como la temperatura, humedad ambiental, radiación solar, precipitación, velocidad y dirección del viento.

Con el apoyo de la computación, actualmente se realiza el procesamiento de dichas variables y se calcula la evapotranspiración de los cultivos y los requerimientos de riego de los cultivos casi de manera automática. Asimismo con el monitoreo del suelo mediante sensores se obtiene su condición hídrica. De esta manera es posible responder con oportunidad a las necesidades de riego de los cultivos, lo cual genera un mayor rendimiento de los cultivos bajo un esquema eficiente en el uso del agua.

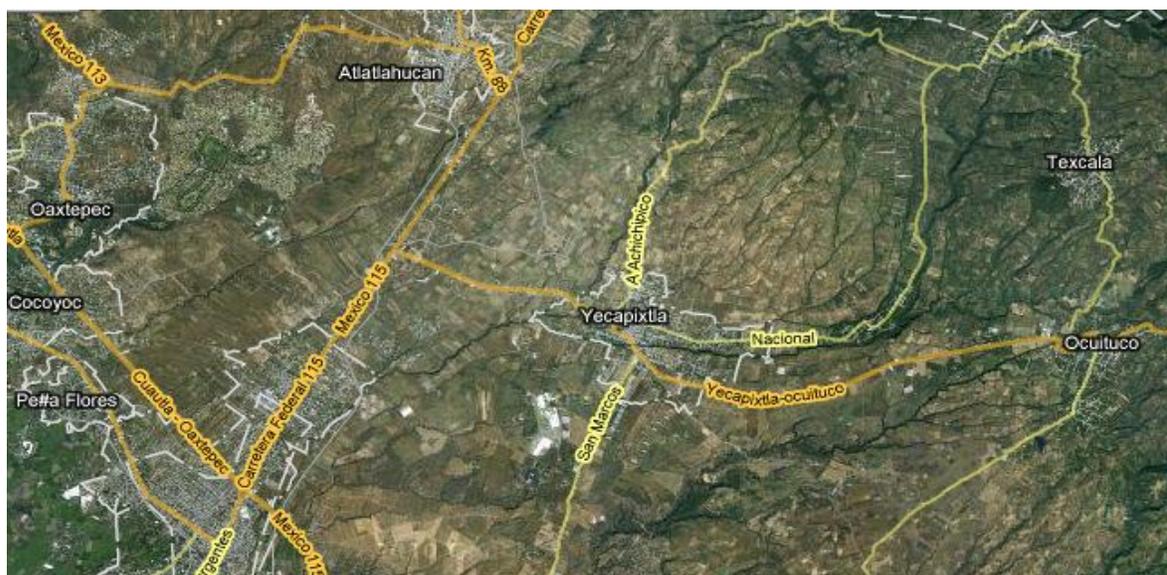
Con base en datos de la Comisión Nacional del Agua, la agricultura de riego en nuestro país consume un 78 % del agua utilizada, sin posibilidad de ampliar este porcentaje debido a que los otros sectores como son el agua para uso doméstico, servicios, industrial y de recreación demanda cada vez mayor cantidad de agua. Por otro lado, la demanda de alimentos por la población es cada vez mayor, por lo que ante esta problemática, la solución en la agricultura de riego consiste en incrementar la productividad del agua.

La importancia de la agricultura bajo condiciones de invernadero en México se refleja en el grado de desarrollo que se ha tenido en los últimos años, por ejemplo la superficie cubierta en el año 2004 era de 2,306 ha (AMPHI 2004), para el 2008 la superficie fue de 4,305 ha (INTAGRI-AMHPAC, 2008).

## 1.1.2. Actividades

### 1.1.2.1. Selección del productor y módulo de invernadero

Se seleccionó un invernadero de un productor cooperante, C. José Luis Trejo Sánchez, localizado en la población de Ocuituco, estado de Morelos, para llevar a cabo la producción de un cultivo de jitomate desarrollado bajo condiciones de ambiente protegido. En la Ortofoto 1.1 se muestra la ubicación del sitio. Sus coordenadas geográficas son 18°52.881 de latitud norte y 98°47.039 de longitud oeste, a una altura de 1852 metros sobre el nivel del mar.



**Ortofoto 1.1.** Localización del invernadero en la carretera Yecapixtla-Ocuituco, Morelos.

### 1.1.2.2. Caracterización del invernadero

El invernadero seleccionado tiene una superficie de 3,500 m<sup>2</sup>, de 100 m x 35 m de ancho. Cuenta con una estructura de aluminio, conformado por seis naves cada una, cubierta con plástico, y un sistema de mallas laterales para protección de antiáfidos. En la Ortofoto 1.2 se observa el invernadero.



**Ortofoto 1.2.** Ubicación del invernadero.



**Ilustración 1.1.** Tanque-cisterna de almacenamiento del agua.

La fuente de abastecimiento del agua de riego proviene de un pozo profundo con capacidad de 1 litro por segundo, el cual descarga en un tanque-cisterna de almacenamiento antes de su incorporación al cultivo. En la Ilustración 1.1 se muestra el tanque de almacenamiento del agua bombeada del pozo profundo, el cual tiene una capacidad de 80 metros cúbicos.

El cabezal de bombeo consta de un sistema de bombeo que abastece a una superficie total de 2 ha con invernadero. Consta de un equipo motor bomba, un sistema de filtrado de discos y un sistema de inyección de fertilizantes. Las Ilustraciones 1.2. y 1.3 muestran el cabezal de bombeo.



**Ilustración 1.2. y 1.3.** Cabezal de bombeo. Equipo motor bomba y filtrado e inyección de fertilizantes.

El sistema de riego, está compuesta por una red de conducción principal de tubería de PVC, en diámetro de 75 mm, con una longitud de 80 m. Esta línea abastece a cuatro secciones de riego. La red de conducción secundaria o distribuidor abastece a cada una de las secciones. La línea secundaria tiene una longitud total de 40 m, en un diámetro de 50 mm. Las líneas regantes tienen una longitud de 25 m, es un tubo de polietileno de baja densidad PEBD de 17 mm de diámetro.



**Ilustración 1.4. y 1.5.** Cultivo de jitomate en suelo natural, fotos correspondientes a dos etapas del cultivo.

El cultivo instalado es jitomate bola variedad Charleston imperial de ciclo indeterminado. En las Ilustraciones 1.4. y 1.5, se muestra el cultivo con fecha de trasplante del 12 de enero de 2011, con una densidad de siembra de 2.65 plantas por metro cuadrado, es decir, un total de 9,275 plantas en la superficie que cubre la nave de 3,500 m<sup>2</sup>.

#### 1.1.2.3. Análisis del tipo de suelo

Con fecha 03 de marzo de 2011, se obtuvieron dos muestras de suelo para determinar las características de textura del suelo e información fisicoquímicos (Ilustración 1.6.).

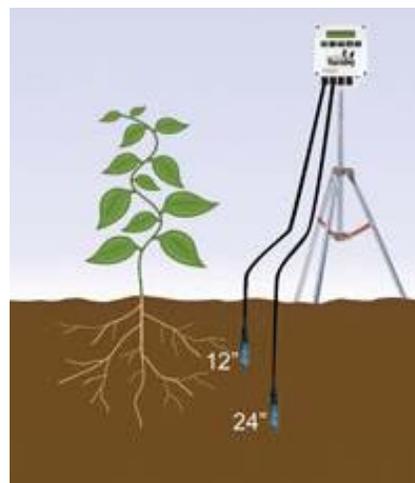


**Ilustración 1.6.** Toma de muestra de suelo para su análisis.

#### 1.1.2.4. Instalación de estación meteorológica.

Para la toma de datos climatológicos, se seleccionó una estación Spectrum Watchdog 2550, con (6) canales para sensores externos; sensores incluidos: Sensor de Velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa.

Otros sensores seleccionados fueron: un piranómetro, dos sensores de humedad del suelo Waterscout con 6 y 20 pies de cable, un medidor digital portátil para el sensor de humedad, una microestación con sensor de temperatura y humedad relativa integrado y 2 canales para sensores adicionales, un pluviómetro. En las láminas 1.1. y 1.2. se muestran los esquemas de la estación climatológica y del medidor digital portátil para el sensor de humedad.



**Láminas 1.1. y 1.2.** Estación climatológica y medidor digital portátil para el sensor de humedad.

En la ilustración 1.7 se muestra el espacio de oficina, implementado para la captación y recepción de la información climatológica mediante una computadora para recibir la información de los datos climatológicos de una estación meteorológica, registrando información para las condiciones de dentro y fuera del invernadero.



**Ilustración 1.7.** Oficinas para la captación y recepción de la información climatológica.

Se llevó a cabo la instalación del equipo de la estación meteorológica dentro de las instalaciones de la empresa Tecnifrutos, en Ocuilco, Morelos. Dentro del equipo a

instalar se consideró uno que mida los parámetros en la parte interior del invernadero y otro equipo adicional para medir las condiciones externas (Ilustración 1.8. y 1.9.).



**Ilustración 1.8. y 1.9.** Armado de la estructura de la estación meteorológica.

Los sensores que se consideraron para su instalación dentro del invernadero son para medir los siguientes parámetros: humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y humedad del suelo (Ilustración 1.10. y 1.11.). Los sensores considerados para su instalación fuera del invernadero son para medir los siguientes parámetros: humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y precipitación pluvial.



**Ilustración 1.10. y 1.11.** Datalogger y su revisión dentro del invernadero.

Se finalizó la instalación de todos los sensores dentro y fuera del invernadero de la empresa Tecnofrutos, en Ocuilco, Morelos en 8 y 21 junio 2011, respectivamente. Se instalaron sensores de Temperatura del aire y humedad relativa, radiación solar, y humedad del suelo (instalado a 15cm de profundidad) dentro del invernadero.



**Ilustración 1.12.** Caja de instrumentación y sensores de Temperatura y Humedad relativa dentro del invernadero.



**Ilustración 1.13.** Sensor de radiación solar dentro del invernadero.

En el exterior del invernadero se instalaron sensores de temperatura del aire y humedad relativa a la misma altura que los sensores instalados al interior del invernadero; los sensores de radiación solar, velocidad del viento y precipitación se instalaron en el techo del invernadero para asegurar que no estén tapados u obstaculizados por paredes de edificios cercanos. Se presentaron algunas fallas intermitentes en el sensor de radiación solar del exterior del invernadero, así como en el anemómetro. Estas fallas se reportaron a la empresa proveedora de los equipos, quedando pendiente el cambio y/o reparación de dichos sensores bajo los términos de la garantía. Las fallas antes mencionadas no afectarán el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y del requerimiento de riego, ya que no se afectaron los sensores instalados dentro del invernadero.



**Ilustración 1.14.** Instalación del sensor de humedad del suelo.



**Ilustración 1.15.** Sensores de Temperatura y Humedad relativa afuera del invernadero.



**Ilustración 1.16.** Sensores de radiación solar, viento y lluvia en el techo del invernadero.

Se colocó la estación dentro del invernadero en su sitio definitivo el día 21 de junio 2011, colocado más hacia el centro del invernadero. Se instaló un cable de conexión directa desde la estación en el invernadero a la computadora PC en la oficina del productor cooperante de la empresa Tecnofrutos. Se instaló y se configuró el software para visualizar y bajar los datos de clima de forma automática (ilustración 1.17.). Se comprobó el funcionamiento de todos los sensores instalados dentro y fuera del invernadero y se bajaron los datos preliminares de las 2 semanas anteriores.



**Ilustración 1.17.** Programa de software de control en la PC, configurado para bajar los datos.

Posteriormente, se reparó una falla en el cable de extensión del sensor de radiación solar en el techo del invernadero. Se cuenta con datos de este sensor a partir del 21 de julio 2011, sin embargo, hasta la fecha este sensor sigue presentando fallas intermitentes, se espera su reemplazo con un sensor nuevo bajo los términos de la garantía.

El 25 de agosto 2011 se dio capacitación al encargado del invernadero (C. Ignacio Castillo) en aspectos de mantenimiento y diagnóstico de fallas en los sensores: se dio un mantenimiento completo a todos los sensores, limpiándolas y nivelando los sensores de radiación solar. Durante el mantenimiento se detectó que el anemómetro había dejado de funcionar debido a unos trozos de plástico atascados en el mecanismo del aparato. Se puso en contacto con la empresa proveedora para solicitar una visita de su técnico para que le cambien o reparen este sensor que parece sufrir algún desperfecto de fábrica.

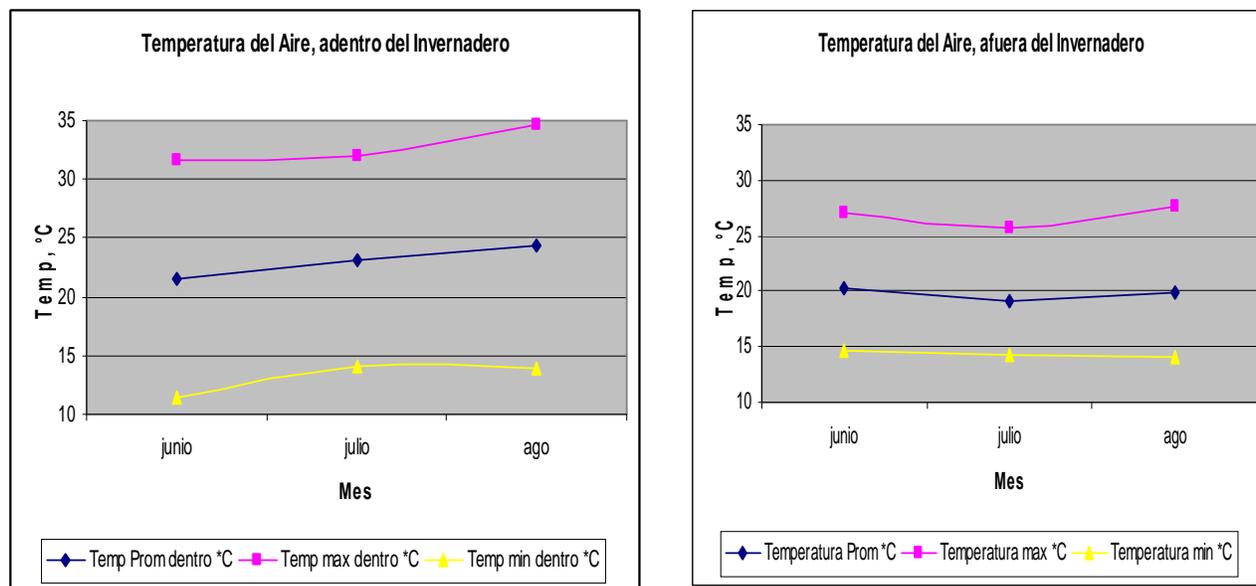
## 1.2. SEGUIMIENTO DEL CULTIVO, REGISTRO Y ANÁLISIS DE VARIABLES EN EL INVERNADERO

### 1.2.1. Registro de datos climatológicos

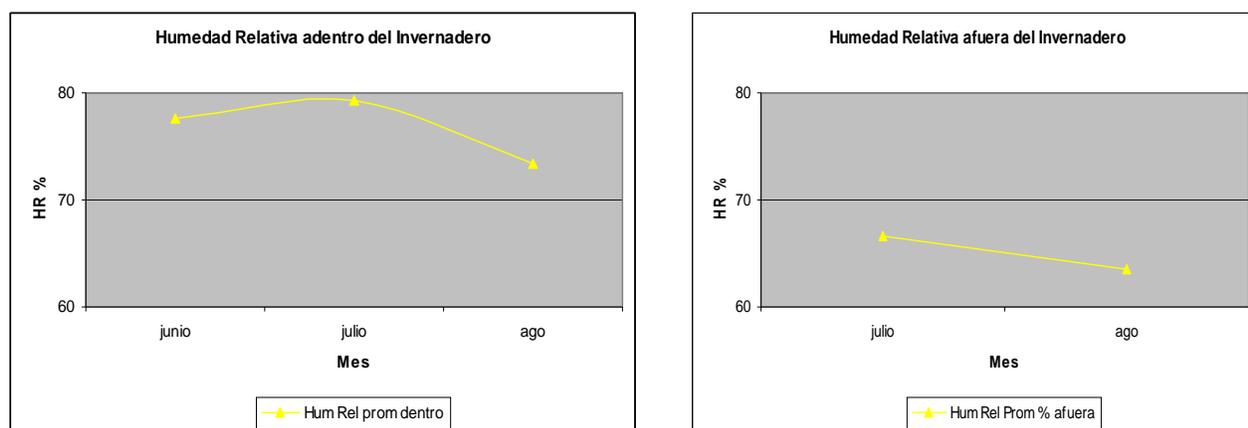
En el sitio escogido, a 18°52.881 de latitud norte y 98°47.039 de longitud oeste, con una altura de 1852 m.s.n.m, se registraron los promedios, máximos y mínimos de los siguientes parámetros meteorológicos en intervalos de 15 minutos: precipitación, velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa afuera del invernadero, y radiación solar, temperatura, humedad relativa y del suelo adentro del invernadero (Figura 1). Los sensores de temperatura y humedad relativa se instalaron a la misma altura (1.80 m) dentro y fuera del invernadero. El piranómetro dentro del invernadero se instaló sobre una estructura metálica de soporte, arriba de la altura máxima de las plantas de jitomate. El piranómetro, anemómetro, y pluviómetro afuera del invernadero se instalaron sobre el techo a 5.0 m de altura, ya que no hay otro sitio despejado adecuado para medir entre los invernaderos. Basado en los datos de los sensores adentro y afuera del invernadero se estimó la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) usando el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). En base de la ET<sub>o</sub>, la fecha de siembra (12 de diciembre 2010) y de transplante (12 de enero 2011), y el coeficiente de cultivo para jitomate, se calculó la evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>r</sub>) y el requerimiento de riego (RR). Para condiciones afuera del invernadero, se restó la precipitación efectiva de la ET<sub>r</sub> para estimar el requerimiento de riego, mientras que, para condiciones dentro del invernadero, el requerimiento de riego es igual a la ET<sub>r</sub> ya que la cubierta de plástico del invernadero evita que entre lluvia adentro.

A continuación se muestran gráficas de los datos recolectados hasta la fecha, por la estación meteorológica. La gráfica 1.1. (a y b) muestra la temperatura mínima, máxima y promedio mensual para los meses de junio a agosto 2011, adentro y afuera del invernadero. Se aprecia que la variación entre las temperaturas mínima y máxima adentro del invernadero es más extremosa que afuera, y en promedio hay temperaturas más altas adentro que afuera del invernadero. La gráfica 1.2. (a y b) muestra como varía la humedad relativa dentro y fuera del invernadero. La gráfica 1.3. (a y b) muestra los promedios mensuales de la radiación solar, medidos dentro y fuera del invernadero. Se nota que la humedad relativa adentro del invernadero es significativamente más alta que la de afuera, mientras que lo opuesto es el caso de la radiación solar (debido al plástico superior del invernadero), con valores más bajos registrados adentro que afuera del invernadero. Adicionalmente, ya se cuenta con un cálculo preliminar de la evapotranspiración de referencia para junio, julio y agosto 2011 (gráfica 1.4.). Se observa un ligero incremento mes con mes de la ET<sub>o</sub> diaria promedio entre junio y agosto. Cabe mencionar que el cálculo de la ET<sub>o</sub> con estos datos utilizados toma en cuenta los valores de la velocidad del viento medidos afuera del invernadero, por lo tanto, será necesario recalcular la ET<sub>o</sub> para

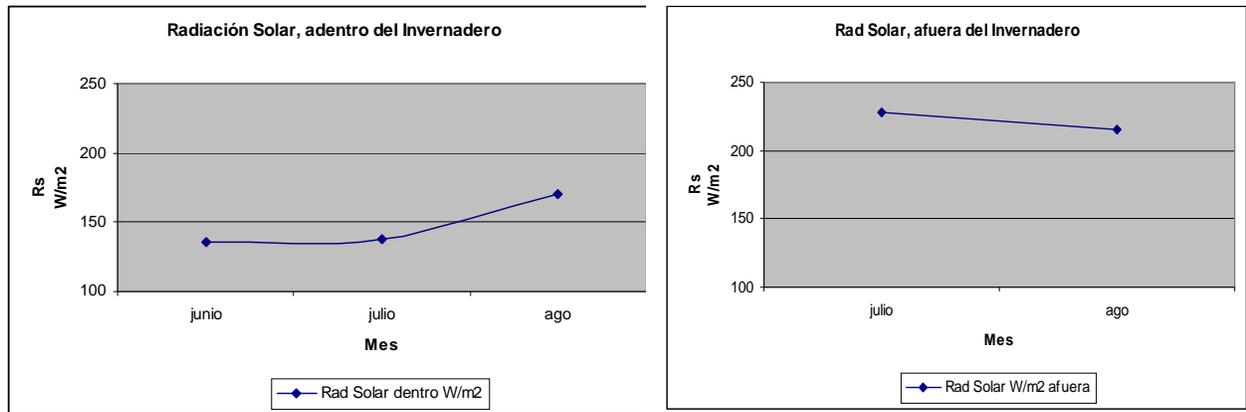
hacer un ajuste ya que la velocidad del viento dentro del invernadero tiende a valores de cero. Se espera que con el ajuste, resulten más bajos los valores de la ETO. Los totales mensuales de la lluvia se aprecian en la gráfica 1.5., donde destaca que el total del mes de julio es mucho más alto que los otros dos meses, ya que se registraron lluvias extraordinarias entre el 10 y 11 de julio 2011 (456 y 343 mm diarios, respectivamente).



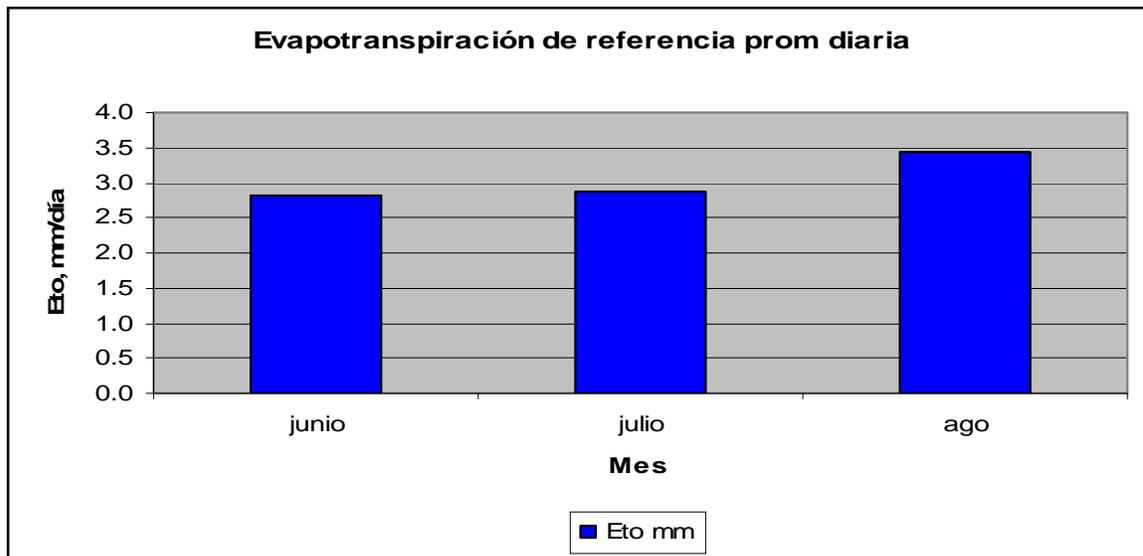
**Gráfica 1.1. (a y b).** Temperatura del aire mínima, máxima y promedio mensual dentro y fuera del invernadero, Ocuilco, Morelos.



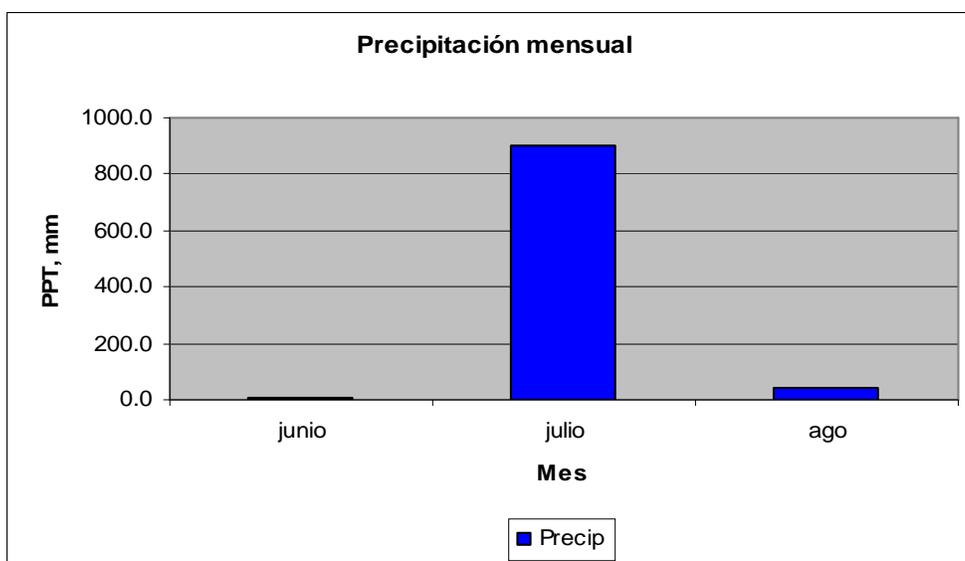
**Gráfica 1.2. (a y b).** Humedad relativa promedio mensual dentro y fuera del invernadero, Ocuilco, Morelos.



**Gráfica 1.3. (a, b).** Radiación solar promedio mensual dentro y fuera del invernadero, Ocuituco, Morelos.



**Gráfica 1.4.** Evapotranspiración de referencia promedio diaria (con datos de viento registrados fuera del invernadero), para el invernadero de Ocuituco, Morelos.



**Gráfica 1.5.** Total mensual de la lluvia registrada en Ocuituco, Morelos.

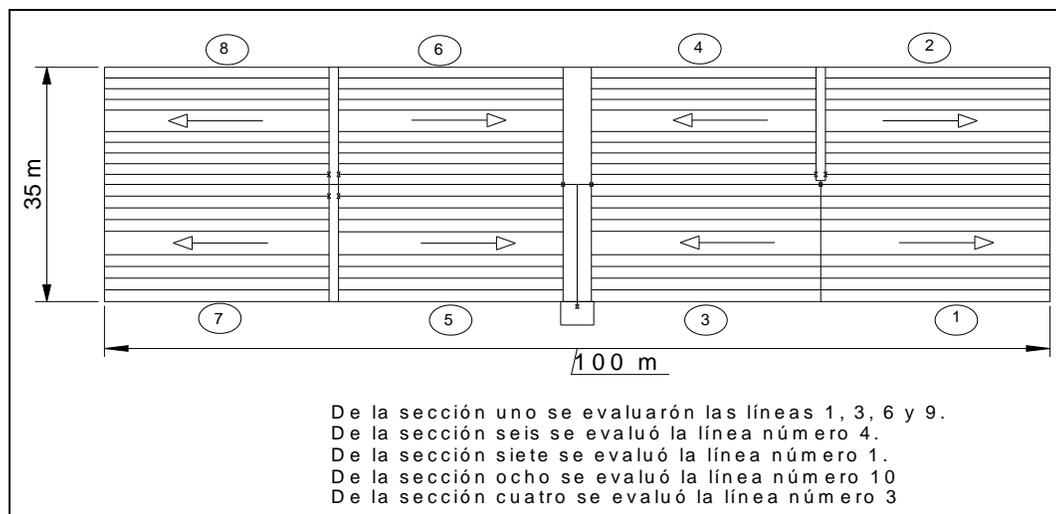
### 1.2.2. Evaluación hidráulica del sistema de riego del invernadero

El invernadero consta de una nave de 100 m de largo por 35 de ancho y tiene una superficie de 3500 m<sup>2</sup>. En el período de la evaluación, el cultivo se encuentra en plena producción.

La fuente de abastecimiento es un pozo profundo, la bomba con la que se extrae el agua está muy sobrada, ya que se tiene un regreso del gasto de riego considerable, lo cual representa un uso muy deficiente de la energía.

El cultivo se encuentra establecido en camas de 1.75 m de ancho con acolchado y por debajo del acolchado están instaladas dos líneas de cintillas de goteo por cada cama. Tiene un sistema de riego con cintilla de goteo, con mangueras de polietileno de baja densidad de 16 mm de diámetro, la cual por lo general se desecha cada ciclo. El sistema está integrado por 8 secciones de riego, las cuales se riegan todas en forma simultánea. Estas secciones se distribuyen dentro del invernadero formando una cuadrícula de cuatro secciones a lo largo por dos secciones a lo ancho.

El largo de las secciones de riego es de 23 a 25 m de largo y el ancho es de 17.5 m en promedio (lámina 1.3.), al centro del invernadero hay un andador de aproximadamente 2.5 m de ancho. Todas las válvulas de las secciones se encuentran enterradas para su protección, por lo que su posición es fija.



**Lámina 1.3.** Secciones de riego del Invernadero Ocuituco, Morelos.

A la entrada de invernadero se localiza una válvula que controla todas las secciones de riego del invernadero, la tubería distribuidora entra por el andador hasta un punto al centro del invernadero y de ahí se divide en dos tuberías una a la derecha y otra a la izquierda a lo largo del invernadero, llegando al centro de cada mitad del invernadero, en cada uno de esos puntos se encuentran las válvulas y salen los distribuidores en forma paralela, las líneas regantes van en un solo sentido, unas a favor de la pendiente y otras en contrapendiente. La pendiente general del invernadero es del orden del 5 %, por lo que la longitud de las secciones de riego es pequeña.

Los datos generales del productor y de las características básicas del invernadero se indican en el cuadro 1.1.

En la Ilustraciones 1.18. y 1.19. se muestran el cabezal del sistema de riego, incluyendo el equipo de inyección de fertilizante y el equipo de filtrado.

En las Ilustraciones 1.20. y 1.21. se indican las mediciones de gastos y presiones de riego realizadas al sistema de riego por cintilla en el invernadero.

**Cuadro 1.1.** Datos generales del productor y características básicas del sistema de riego evaluado.

Fecha:	8 de julio de 2011
Nombre del productor:	José Luis Trejo Sánchez
Teléfono del productor	01 731 35 7 01 15
Nombre del predio o campo:	Tecnifrutos
Nombre del técnico:	Ignacio Castillo
Tipo de tenencia:	Pequeña propiedad
Localidad:	Ocuituco
Municipio:	Ocuituco
Entidad Federativa:	Morelos
Cultivo:	Jitomate
Fecha de siembra	12 de enero de 2011
Superficie del invernadero (ha):	0.4
Pendiente del terreno (%):	Mayor de 5 %
Duraciones del riego de la superficie tecnificada:	4 riegos al día, de 10 minutos cada riego
Textura del suelo:	Franca



**Ilustración 1.18. y 1.19.** Cabezal del sistema de riego. Equipos de inyección de fertilizante y equipo de filtrado.



**Ilustración 1.20. y 1.21.** Evaluación hidráulica del sistema de riego.

Para realizar la medición de los gastos de los emisores, se utilizaron recipientes con capacidad de 1 litro, con la finalidad de captar el volumen de agua de los cuatro riegos del día, además de los posibles goteos o drenaje posteriores, esto es, el agua que queda en la manguera al terminar el tiempo de riego y la cual se vacía en su mayoría durante los intervalos de riego.

Como era de esperarse se obtuvo un coeficiente de uniformidad baja del sistema de riego, debido principalmente a la fuerte pendiente. Para verificar esto, se seleccionaron otras cuatro secciones de riego, distribuidas en todo el invernadero y en una línea de riego de cada una de estas secciones, se realizó un aforo complementario con el cual se tuvieron otros 16 puntos de aforo, para un total de 48 en todo el invernadero.

También se midió la presión al inicio y final de cada una de las cintillas aforadas, para un total de 24 puntos de medición de presión. La medición de la presión no se pudo realizar en los cuatro lapsos de riego de 10 minutos cada uno, por lo que se solicitó un tiempo de 12 minutos adicionales al tiempo normal para terminar la medición.

Se aplican durante el día cuatro pulsos de riego, con una duración de 10 minutos cada uno y a un intervalo de 2 horas cada aplicación, iniciando generalmente a las 8 de la mañana y terminando a las 2 o 3 de la tarde. Cabe mencionar que en el predio se tienen en producción seis invernaderos de dimensiones similares y el riego se va turnando entre ellos uno a la vez.

Para la evaluación del sistema de riego se seleccionó la sección con condiciones más desfavorables, esto es la del extremo más alto, en esta se realizaron aforos en 16 puntos

distribuidos en cuatro camas y en las dos cintillas de goteo de cada cama para un total de 32 puntos de aforo.

### 1.2.3. Caracterización fisicoquímica del suelo.

En el cuadro 1.2 se indican los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo proveniente de una de las naves de invernadero de Ocuituco, Morelos.

**Cuadro 1.2.** Resultados del análisis fisicoquímico del suelo.

No. CONTROL	pH	CE dSm <sup>-1</sup>	Ca meqL <sup>-1</sup>	Mg meqL <sup>-1</sup>	Na meqL <sup>-1</sup>	K meqL <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> meqL <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> meqL <sup>-1</sup>
1033	6.53	1.12	4.74	4.62	1.15	0.33	ND	1.54
1034	6.96	0.81	4.68	2.28	1.04	0.29	ND	1.67

Nº CONTROL	Cl meqL <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> meqL <sup>-1</sup>	B mg Kg <sup>-1</sup>
1033	0.95	8.06	1.11
1034	0.75	5.57	0.62

Nº CONTROL	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	TEXTURA
1033	54.2	34.0	11.8	FRANCO ARENOSO
1034	50.2	34.0	15.8	FRANCO

#### METODOLOGIA:

pH:	POTENCIOMETRICO.
CE:	PUENTE DE CONDUCTIVIDAD.
Ca, Mg:	ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCION ATOMICA.
K,Na:	ESPECTROFOTOMETRIA DE EMISION DE FLAMA
CO <sub>3</sub> ,HCO <sub>3</sub> :	VOLUMETRIA DE ACIDO SULFURICO (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Cl:	VOLUMETRIA DE NITRATO DE PLATA (AgNO <sub>3</sub> )
SO <sub>4</sub> :	TURBIDIMETRIA DE CLORURO DE BARIO (BaCl <sub>2</sub> )
B:	EXTRAIDO CON CaCl <sub>2</sub> 1.0M FOTOCOLORIMETRIA DE AZOMETINA-
H.	
TEXT.:	HIDROMETRO DE BOUYOUCOS.

#### Identificación:

1033:	Invernadero Ocuituco – muestra lado sur.
1034:	Invernadero Ocuituco – muestra lado norte.

#### Interpretación muestra 1034:

<b>pH:</b>	<b>(6.96)</b>	<b>Terreno prácticamente neutro</b>
<b>CE:</b>	(0.81 dS/m)	Libre de salinidad
<b>MO:</b>	<b>(0.94 %)</b>	<b>Pobre en materia orgánica</b>
<b>Ninorg:</b>	(17.6 mg/kg)	<b>Bajo en nitrógeno inorgánico</b>
<b>P:</b>	(36.8 mg/kg)	Moderadamente alto en fósforo “asimilable”
<b>K:</b>	(1430 mg/kg)	Muy alto en potasio “aprovechable”
<b>Ca:</b>	(2247 mg/kg)	Medio en calcio “aprovechable”
<b>Mg:</b>	(768 mg/kg)	Moderadamente alto en magnesio
“aprovechable”		
<b>Fe:</b>	(42.4 mg/kg)	Alto en hierro “asimilable”
<b>Cu:</b>	(4.85 mg/kg)	Muy alto en cobre “asimilable”
<b>Zn:</b>	(7.30 mg/kg)	Alto en zinc “asimilable”
<b>Mn:</b>	(13.13 mg/kg)	Moderadamente alto en manganeso
“asimilable”		
<b>B:</b>	(0.84 mg/kg)	Medio en boro “asimilable”
<b>Dap:</b>	(1.32 t/m <sup>3</sup> )	Media densidad aparente.

Con base en la interpretación anterior y considerando el cultivo de jitomate con fertirriego, se tienen las siguientes consideraciones y recomendaciones:

- **pH.** El terreno es prácticamente neutro. El jitomate se desarrolla mejor en el rango de pH 5.5 a 7.0. Con base en lo anterior, el pH del terreno es ideal para el buen desarrollo y producción de jitomate.
- **CE.** Este terreno no tiene problemas de salinidad, lo cual es ideal para el buen crecimiento y producción de jitomate.
- **Materia Orgánica (MO).** El nivel de materia orgánica es bajo, por lo que es urgente la adición de abonos orgánicos, teniendo como meta alcanzar el valor de 3.5% de materia orgánica en este suelo de textura media, para mejorar la retención de humedad y de los nutrimentos. Una alternativa son las compostas o los estiércoles maduros: 36 t/ha por año de composta o estiércol maduro (peso seco), por lo menos durante 5 años, los cuales se mezclarán con el terreno en la preparación del mismo. Este abono aportará por lo menos 216 kg de nitrógeno aprovechable el primer año, el cual deberá restarse a lo que se recomienda en la fórmula de fertilización. Asimismo solucionará las probables deficiencias de boro.
- **Manejo de nutrimentos.** Se considera que: 1) existe un abastecimiento bajo de nitrógeno y azufre, por el contenido bajo de materia orgánica; 2) se tiene una disponibilidad ligeramente alta de fósforo; 3) el nivel de potasio es muy alto, el de calcio es medio y el magnesio ligeramente alto; 4) el suelo es textura media; 5) no se tiene abono orgánico; 6) se da un buen manejo del fertilizante aplicado para una mejor eficiencia del mismo y para coadyuvar en el control de las plagas y/o enfermedades del jitomate; 7) un potencial de producción alto por estar con riego por goteo (más de 80 t/ha). Con estas consideraciones se deriva la siguiente:
- **Fórmula de fertilización: 350-90-00**  
Significa que se deberá agregar al suelo: 350 kg de nitrógeno (N)/ha; 90 kg de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)/ha, 0 kg de potasio (K<sub>2</sub>O)/ha. A continuación se presenta una

alternativa de fertilización, pudiendo elaborarse otras en función de los fertilizantes disponibles.

Alternativa 1:

P, a la siembra o trasplante, directo al suelo: 196 kg de superfosfato de calcio triple/ha.

N en fertirriego: 758 kg de nitrato de amonio/ha ( $75.8 \text{ g/m}^2$ ) + 645 kg de nitrato de calcio/ha ( $64.5 \text{ g/m}^2$ ) + 3 kg/ha de ácido bórico. Estos fertilizantes se distribuyen en el periodo de crecimiento del jitomate.

Alternativa 2:

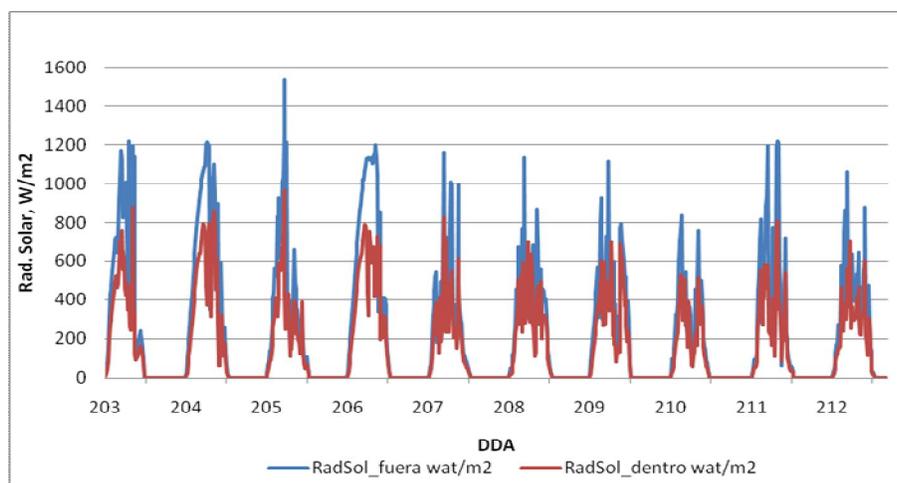
N, P, K, en fertirriego: 150 kg de fosfato monoamónico/ha ( $15.0 \text{ g/m}^2$ ) + 705 kg de nitrato de amonio/ha ( $70.5 \text{ g/m}^2$ ) + 645 kg de nitrato de calcio/ha ( $64.5 \text{ g/m}^2$ ) + 3 kg/ha de ácido bórico. Estos fertilizantes se distribuyen en el periodo de crecimiento del jitomate.

- **Manejo de micronutrientes.** La fertilización al cultivo con boro es conveniente. Cuando el fertilizante se adiciona al suelo, se debe agregar 3 kg/ha de ácido bórico.

Otra alternativa es la fertilización foliar. Se puede construir un fertilizante foliar en casa de la siguiente manera: en 99 litros de agua, se deberá agregar 150 g de ácido bórico + 300 g de urea, más surfactante y adherente, más ácidos fúlvicos. Este fertilizante.

#### 1.2.4. Análisis de datos climatológicos

Se midieron las variables de clima dentro y fuera del invernadero de Ocuituco, Morelos desde principios de julio hasta fines de septiembre 2011. Para efectuar las comparaciones de variables de clima, se escogió un periodo representativo de 10 días en julio cuando todos los sensores estaban funcionando correctamente. Las Gráficas 1.6, 1.7 y 1.8 muestran la radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa, respectivamente, medidas dentro y fuera del invernadero. Valores graficados son promedios de 15 minutos. Basándose en datos promedios diarios para el periodo de 22 a 31 de julio 2011, la radiación solar dentro del invernadero fue 29.6 % más baja que la medida afuera del invernadero, lo que indica una transmisividad del material de plástico del techo del invernadero de un 70% aproximadamente. En comparación, para el mes de agosto, se calculó una transmisividad promedio de 78%. Las diferencias se deben a que durante todo el periodo de mediciones, no hubo días completamente soleados, ya que se midió solamente durante la temporada de lluvias, y no fue posible llegar a una estimación más precisa de la transmisividad bajo las condiciones nubladas prevalentes (Gráfica 1.6.).



**Gráfica 1.6.** Radiación solar medida dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.

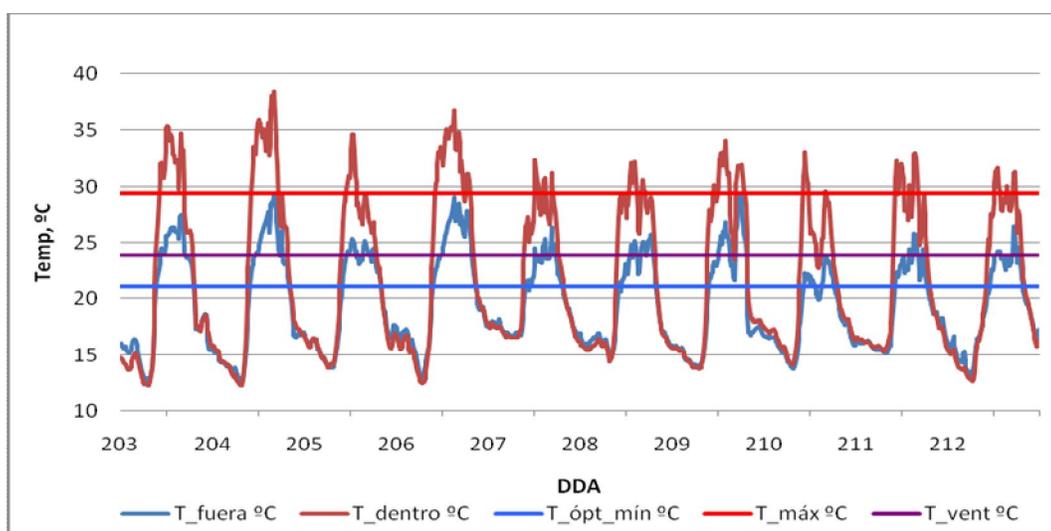
La comparación de la temperatura máxima diaria dentro y fuera del invernadero arrojó una diferencia promedio de 7.4 °C o 27.8% más alto dentro que fuera del invernadero durante el periodo 22-31 de julio 2011, mientras que para todos los datos de principios de julio hasta fines de agosto, la diferencia promedio fue de 25%. Por otro lado, la diferencia en las temperaturas mínimas diarias no fue significativa (solamente 0.2 °C o 1.6% más bajo dentro que fuera del invernadero). Lo anterior se debe a que el invernadero bajo estudio solamente tiene material de plástico en el techo, mientras que los lados son cubiertos por malla-sombra que deja circular el aire. La parte más alta del techo también cuenta con malla-sombra para ventilación, sin embargo, es aparente de los datos que la ventilación en este invernadero es insuficiente, ya que frecuentemente durante medio día las temperaturas dentro del invernadero exceden el umbral máximo de temperatura recomendado para jitomate para iniciar ventilación mecánica (23.9 °C, Cuadro 1.3. y gráfica 1.7.), ya que temperaturas arriba de los 25 °C reducen o impiden completamente la fertilización de las flores. Además, en este invernadero frecuentemente se supera la temperatura óptima máxima de 29.4 °C afectando el desarrollo de la fruta (causando amarillamiento) y de la planta y su sistema de raíces en general.

**Cuadro 1.3.** Temperaturas críticas para cultivos en invernaderos de túnel alto.

Cultivo	Etapas de crecimiento	Temp. óptima (°C)	Temp. máx (°C)	Temp. límite para ventilar (°C)
Jitomate	Transplante-floración	21.1 - 23.9	29.4	23.9
	Floración-cosecha	21.1 - 23.9	29.4	18.3
Pimienta	Transplante-floración	21.1 - 26.7	29.4	23.9
	Floración-cosecha	21.1 - 26.8	32.2	23.9
Berejena	Transplante-floración	21.1 - 29.4	35.0	26.7

Cultivo	Etapas de crecimiento	Temp. óptima (°C)	Temp. máx (°C)	Temp. límite para ventilar (°C)
Curcubitáceas	Floración-cosecha	21.1 - 29.5	35.0	26.7
	Transplante-floración	21.1 - 29.6	32.2	26.7
	Floración-cosecha	23.9 - 29.7	32.2	26.7
Verduras de hoja verde	Siembra-cosecha	15.6 - 18.3	23.9	12.8
Fresa	Siembra Otoño	12.8 - 21.1	23.9	15.6
	Cosecha primavera	18.3 - 23.9	23.9	15.6
Zarzamora	Cosecha Otoño	21.1 - 26.7	32.2	32.2
Frambuesa	Cosecha Otoño	15.6 - 23.9	26.7	23.9

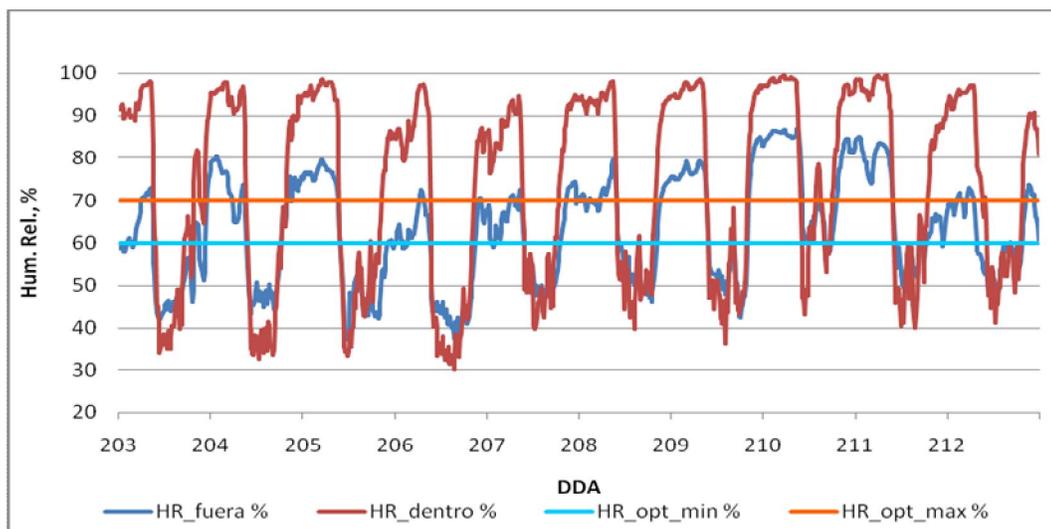
Fuente: Lewis W. Jett, West Virginia University Extension Service



**Gráfica 1.7.** Temperatura del aire medida dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.

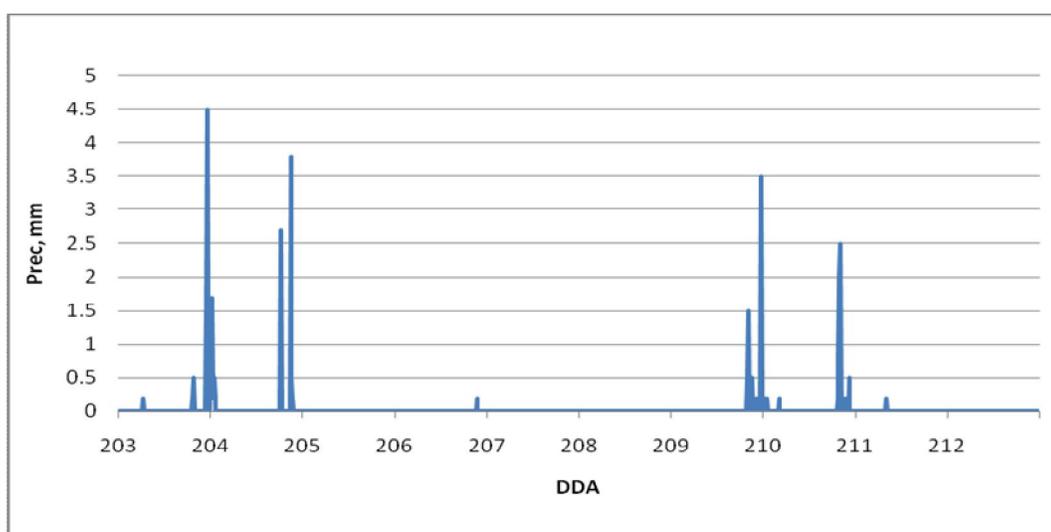
Con respecto a la humedad relativa (HR) promedio diaria, durante el periodo de 22-31 julio 2011, se observó una HR 16.8% más alta dentro que fuera del invernadero, mientras que para el periodo entero de observación de principios de julio hasta fines de agosto, la diferencia porcentual fue de 16.8 %. La gráfica 3.3 muestra que las diferencias mayores ocurrieron durante las noches con diferencias menores a medio día. En general, las diferencias de HR entre día y noche fueron más grandes dentro que fuera del invernadero, lo que es perjudicial para el desarrollo del cultivo, ya que la HR durante la noche sube hasta casi 100%, mucho más alto que el umbral óptimo de HR entre 60 y 70% ideal recomendado por la Universidad del Estado de Mississippi para el crecimiento del jitomate. Cuando la HR es demasiado alta, afecta la polinización de las flores del jitomate, ya que el

polen tiende a formar bolas en vez de dispersarse libremente como granos por el aire, además de favorecer el desarrollo de enfermedades y hongos.



**Gráfica 1.8.** Humedad relativa medida dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.

Como apoyo para poder calcular el requerimiento de riego afuera del invernadero, se midió la precipitación (Gráfica 1.9.). La precipitación total observada de 22-31 de julio 2011 fue de 31.7 mm; para todo el mes de julio fue de 106 mm y para agosto 47 mm. La precipitación efectiva calculada para 22-31 de julio 2011 fue de 31.2 mm (usando el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América).

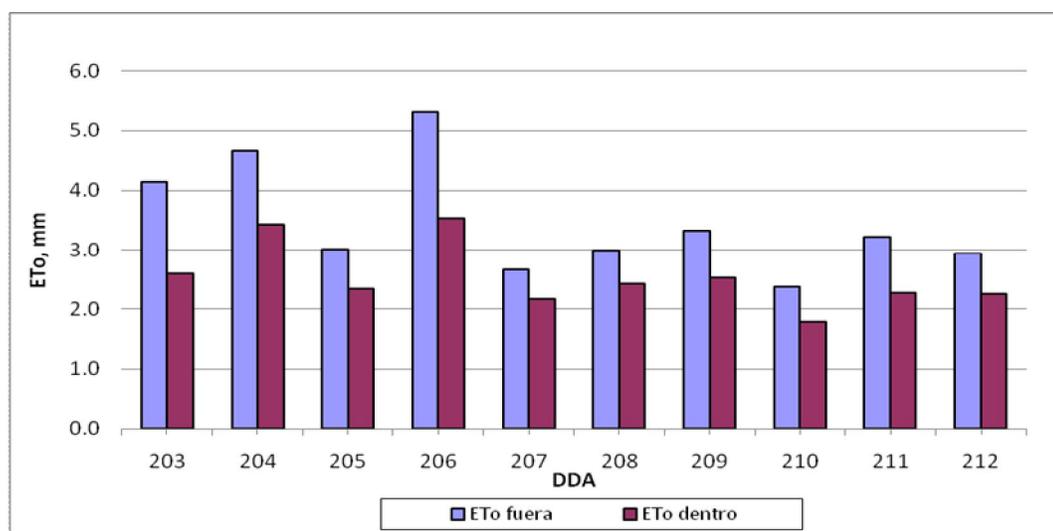


**Gráfica 1.9.** Precipitación medida fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.

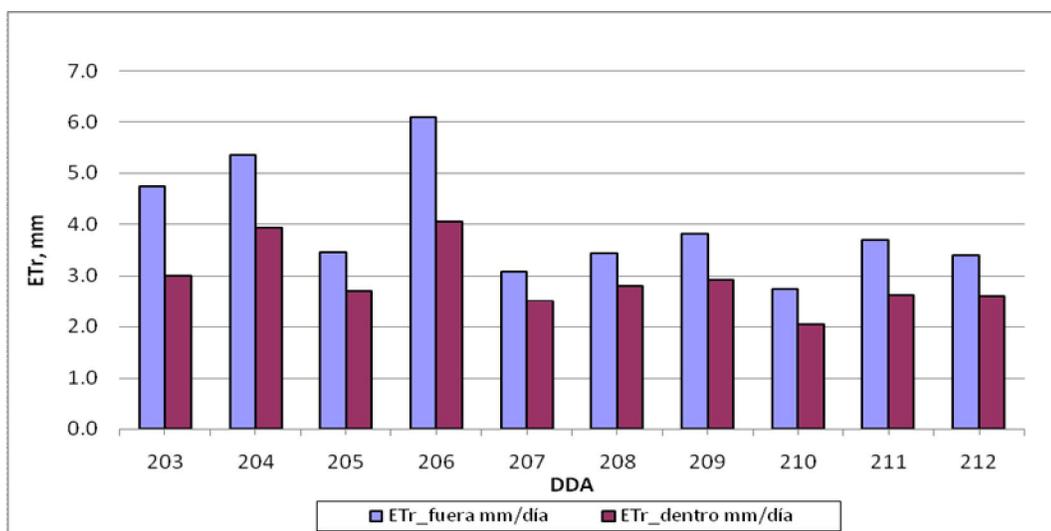
La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) calculada en base de los datos diarios de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, para condiciones afuera del invernadero resultó en promedio 0.9 mm o 25.8% más alto que la ET<sub>o</sub> dentro del invernadero para el periodo de 22-31 julio 2011 (Gráfica 1.10.). Esta diferencia se debe en gran parte a la radiación solar reducida dentro del invernadero, combinado con el efecto de la humedad relativa y temperatura más alta y la velocidad del viento prácticamente nula, ya que hay muy poco movimiento del aire dentro del invernadero que carece de un sistema de ventilación mecánica.

La evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) dentro y fuera del invernadero se calculó multiplicando la ET<sub>o</sub> diaria por un coeficiente de cultivo de 1.15 para jitomate en etapa media de desarrollo (Gráfica 1.11.). Similarmente al comportamiento de la ET<sub>o</sub>, se observa una ET<sub>r</sub> más alta fuera que dentro del invernadero, con promedios de 4.0 mm y 2.9 mm fuera y dentro del invernadero, respectivamente (diferencia de 26.8%) para el periodo 22-31 de julio 2011.

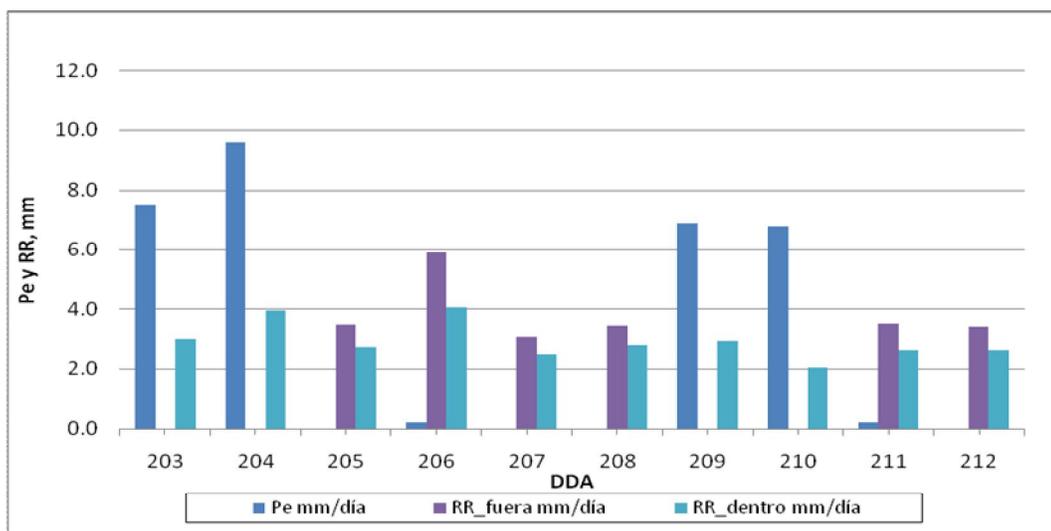
El requerimiento de riego (RR) fuera y dentro del invernadero se contrasta en (gráfica 1.12.). Es importante observar que para los días cuando se presentaron lluvias significativas, el RR fuera del invernadero se redujo prácticamente a cero, mientras que dentro del invernadero, donde el cultivo no pudo aprovechar la lluvia caída afuera, se necesitaba aplicar riegos auxiliares. Por otro lado, en días sin lluvias apreciables, el RR fuera del invernadero fue significativamente más alto que adentro del invernadero, con un RR en promedio 3.0 mm más alto dentro que fuera del invernadero durante días lluviosos, y 1.0 mm (24 %) más bajo durante días secos.



**Gráfica 1.10.** Evapotranspiración de referencia dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.



**Gráfica 1.11.** Evapotranspiración real para jitomate, dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.



**Gráfica 1.12.** Precipitación efectiva y requerimiento de riego para jitomate, dentro y fuera del invernadero, 22-31 Julio 2011.

### 1.2.5. Evaluación hidráulica del sistema de riego del invernadero

En la sección de riego No. 1 el gasto promedio por emisor fue de 0.928 litros por hora, la lámina de riego aplicada durante los 4 riegos del día, con una duración de 10 minutos por riego (40 minutos en total) fue de 5.3 mm, el requerimiento de riego del día fue de 3.6

mm, por lo tanto la eficiencia de aplicación fue de 67.8 %. El Coeficiente de Uniformidad de Christiansen fue de 72.19 por ciento.

Tanto la eficiencia de aplicación (67.8 %) como el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (72.2%), son muy bajas para un sistema de riego presurizado, más aún en invernadero, lo que significa que se están aplicando volúmenes de agua de riego excedentes, y al cultivarse en el suelo, el exceso de humedad se prolonga a otras plantas en donde posiblemente se tiene deficiencia de riego; por lo que aparentemente en la producción no se ve tan afectado el rendimiento. Sin embargo seguramente, si pueden ser notorios en los costos de producción, ya que al aplicar el fertilizante junto con el agua de riego, un 32.2 % se está perdiendo, además de que se incrementa el pago por concepto de energía eléctrica por el bombeo excesivo.

#### Problemática detectada durante la evaluación hidráulica:

De los 48 goteros evaluados, en 6 se midieron gastos de menos de la mitad del gasto promedio, incluso en 2 de estos goteros el gasto que se midió fue de cero, estos goteros por lo general se encontraron en los extremos y partes altas de la cinta. Entre la muestra de los 48 goteros evaluados, también se encontraron otros 4 goteros en los cuales el gasto excedió en dos o tres veces el gasto promedio. Durante la evaluación se detectaron también dos mangueras rotas debido a roedores, con fugas de agua de importancia, mismas que fueron reparadas durante la evaluación por el encargado del sistema.

Durante las dos horas que existen de intervalo entre cada uno de los cuatro riegos de 10 minutos aplicados, las cintillas se vacían principalmente hacia los goteros localizados en las partes más bajas, lo cual representa un 10 por ciento de volumen adicional para los goteros de esa posición ya que el volumen que aplica la cinta cada en 10 minutos es de aproximadamente 30 litros y el volumen que le almacena la cinta y se vacía en los tiempos muertos es de 3 litros. En este caso, la uniformidad se incrementaría si se utilizan goteros antidrenantes. Otro volumen de agua que también se pierde, es el de las tuberías de conducción. Su vaciado se realiza durante la tarde o noche, al igual que en el caso anterior, se descarga en las líneas y emisores de riego ubicadas en las partes bajas del terreno, empeorando la uniformidad del riego.

#### *1.2.6. Volumen de agua consumido*

Con base en las mediciones realizadas al sistema de riego, se determinaron los siguientes valores (cuadro 1.4.) del gasto aplicado, el tiempo de riego, el número de riegos por día, el volumen aplicado por día, la eficiencia de aplicación para el valor de requerimiento de riego del día 08 de julio de 2011, fecha en que se llevó a cabo la evaluación hidráulica del sistema de riego.

**Cuadro 1.4.** Parámetros obtenidos de la evaluación del riego.

Parámetro	Valor
Superficie (ha)	3,500
Gasto de riego (l/s)	7.7
Tiempo por riego (minutos)	10
Número de riegos al día	4
Volumen aplicado por día (m <sup>3</sup> )	18.576
Requerimiento de riego (mm/día)	3.6
Lámina de riego promedio (mm/día)	5.3
Volumen por planta (litros/día)	2
Eficiencia aplicación (%)	67.8
Coefficiente de Uniformidad Christiansen. (%)	72.2

El volumen de agua consumido en el período del 12 de enero al 31 de julio de 2011 considerando un total de 9,275 plantas en la superficie de 3,500 m<sup>2</sup> de invernadero, con un consumo promedio de 0.75 litros de agua para el periodo del 12 al 31 de enero, de 1.0 litros en el periodo del 01 al 28 de febrero, de 1.5 litros de 01 al 31 de marzo, de 1.75 litros del 01 al 30 de abril, y de 2.0 litros del 01 de mayo al 31 de julio; es de 3,023.65 metros cúbicos. En el cuadro 1.5. se indican los días considerados en cada periodo, el volumen promedio de agua consumido por planta y el volumen total por periodo.

**Cuadro 1.5.** Consumo de agua en el periodo del 12 de enero al 31 de julio de 2011. Invernadero Tecnifrutos de Ocuituco, Morelos.

Periodo	Días	Vol./día/planta (litros)	Volumen (m <sup>3</sup> )
12-31 enero 2011	20	0.75	139.1
01-28 febrero 2011	28	1.0	259.7
01-31 marzo 2011	31	1.5	431.3
01-30 abril 2011	30	1.75	486.9
01-31 mayo 2011	31	2	575.1
01-30 junio 2011	30	2	556.5
01-31 julio 2011	31	2	575.1
Total	201		3,023.65
Número de plantas	9275		

### 1.2.7. Costos de producción e ingresos por cosecha

Los costos de producción de enero a julio de 2011, periodo en el que se llevó a cabo el cultivo de jitomate, se agruparon y se determinaron en los siguientes conceptos: (a) preparación del sustrato y desinfección, (b) semilla (plántula) y plantación, (c) fertilizantes, (d) productos para control de plagas y enfermedades, (e) agua y energía para bombeo, (f) mano de obra para labores culturales, (g) recolección de cosecha, (h) selección y empacado de fruto y (i) vigilancia y mantenimiento. El importe de estos conceptos se muestra en el cuadro 3.4, el importe promedio es de \$ 311,500 para el módulo de invernadero de 3,500 metros cuadrados.

**Cuadro 1.6.** Costos de producción, ingresos y utilidad neta del invernadero (3,500 m<sup>2</sup>).  
Empresa Tecnifrutos de Ocuituco, Morelos. Período de enero a julio del 2011.

Concepto	Importe (\$)
1. Preparación del sustrato y desinfección	7,437.50
2. Semilla (plántula) y Plantación	29,750.00
3. Fertilizantes	56,875.00
4. Productos para control de plagas y enfermedades	43,750.00
5. Agua y energía para el bombeo	10,937.50
6. Mano de obra para labores culturales	65,625.00
7. Recolección de cosecha	23,625.00
8. Selección y empacado de fruto	47,250.00
9. Vigilancia y mantenimiento.	26,250.00
Total costos de producción (\$)	311,500.00
Rendimiento (Ton)/3500 m <sup>2</sup>	81.38
Precio medio (\$/Ton)	6,000.00
Ingresos por venta (\$)	488,250.00
Utilidad neta (\$)/3500 m <sup>2</sup>	176,750.00

El rendimiento fue de 81.38 toneladas, con un precio medio durante todo el periodo de ventas que fue de los meses de abril a julio, de \$ 6,000.00 por tonelada. Por lo que el ingreso por venta fue de \$ 488,250.00, y la utilidad neta de 176,750.00 pesos.

### 1.2.8. Productividad del agua

Con base en el rendimiento de 81.38 ton y el consumo de agua de 3,023.65 m<sup>3</sup>; resulta que se requiere un volumen de agua de 37.1 litros para producir un kilogramo de jitomate.

### 1.2.9. Conclusiones y Recomendaciones

Durante el estudio de campo, se contrastaron las condiciones climáticas dentro y fuera del invernadero. Se observaron temperaturas máximas significativamente más altas durante el día dentro que fuera del invernadero, y una humedad relativa máxima mucho más elevada durante la noche dentro que fuera del invernadero, ambas condiciones perjudiciales para el desarrollo del cultivo de jitomate. La demanda hídrica del cultivo fue generalmente más alta para condiciones fuera que dentro del invernadero debido al techo de plástico reduciendo la radiación solar recibida dentro del invernadero en un 30%. Por otro lado, el efecto en el requerimiento de riego fue variable, con valores más altos dentro que fuera del invernadero en días lluviosos, ya que las lluvias frecuentemente superaron la evapotranspiración real del cultivo reduciendo el requerimiento de riego afuera del invernadero esencialmente a cero. Por otro lado, el requerimiento de riego fue más bajo dentro que fuera del invernadero durante días secos debido en gran parte a la reducida radiación solar.

Basado en las observaciones de temperatura y humedad relativa, se recomienda estudiar la posibilidad de instalar un sistema de ventilación mecánica para mejorar el ambiente dentro del invernadero, creando condiciones más adecuadas para el desarrollo del cultivo lo que se espera resultará en una mejor calidad y rendimiento del fruto.

Con la información climatológica registrada, se obtuvo un requerimiento de riego que varió de 2.8 a 4 mm/día para el periodo del 22 al 31 de julio. Utilizándose con fines de evaluación de la eficiencia de riego el dato de 3.6 mm/día correspondiente a la fecha del 08 de julio. La eficiencia de aplicación calculada fue de 67.8 %, y el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen fue de 72.19 por ciento.

El rendimiento del cultivo de jitomate fue de 81.38 toneladas, con un costo de producción de \$ 311,500.00, el precio medio del producto durante el periodo de ventas de los meses de abril a julio, fue de \$ 6,000.00 por tonelada; Por lo que el ingreso por venta fue de \$ 488,250.00, y la utilidad neta de 176,750.00 pesos.

Con base en el rendimiento de 81.38 ton y el consumo de agua de 3023.65 m<sup>3</sup>; resulta que se requiere un volumen de agua de 37.1 litros para producir un kilogramo de jitomate.

Con respecto al sistema de riego, se recomienda dar un mantenimiento oportuno a la cinta de riego, para evitar fugas y pérdidas de agua, e incrementar la uniformidad del riego y el rendimiento del cultivo.

## Anexo 1. Mediciones de la evaluación hidráulica del sistema de riego por cintilla en el invernadero de la empresa Tecnifrutos de Ocuituco, Morelos.

AFORO COMPLEMENTARIO AL SISTEMA DE RIEGO DEL INVERNADERO								
SECCIONES Nos. 4, 6, 7 y 8								
		Sección No. 4		Línea de aforada No. 5		Regante 2/3		
	Punto	Inicio	Punto 1/3 (L)		Punto 2/3 (L)		Punto final	
		Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)
Tiempo de emisión minutos	52	3143	1065		870		850	
Promedio gasto (l/h)		3.627	1.229		1.004		0.981	
		Sección No. 6		Línea de aforada No. 6		Regante 1/3		
Tiempo de emisión minutos	52	1145	1005		955		955	
Promedio gasto (l/h)		1.321	1.160		1.102		1.102	
Presión(kg/cm2)		0.54	0.54				0.49	0.55
		Sección No. 7		Línea aforada No. 7		Línea regante inicial		
Tiempo de emisión minutos	52	1329	880		750		1080	
Promedio gasto (l/h)		1.533	1.015		0.865		1.246	
Presión(kg/cm2)		0.53	0.53				0.45	0.5
		Sección No. 8		Línea de aforada No. 8		Regante final		
Tiempo de emisión minutos	52	1885	2458		1017		805	
Promedio gasto (l/h)		2.175	2.836		1.173		0.929	
Presión(kg/cm2)		0.52	0.52				0.5	0.41

### Evaluación de sistema de riego por goteo o cintilla

#### Información solicitada al productor y mediciones durante la evaluación

##### Generales

Fecha riego actual	08/07/2011	
Fecha riego anterior	07/07/2011	
Intervalo de riego (días)	1	
Tiempo de inicio del riego (horas y minutos)	8	0
Tiempo del final del riego (horas y minutos)	14	22
Fecha de riego programado por productor	NO APLICA	
Tiempo de riego programado por productor	40 minutos	

##### Toma de puntos con G.P.S.

Fuente de abastecimiento y cabezal	Pozo profundo
Perímetro y UCA de la sección evaluada	NO APLICA
Perímetro en secciones de riego simultáneo	NO APLICA

##### Toma de fotografías

Fuente de abastecimiento y cabezal	
UCA de la sección evaluada y al cultivo	Si
Durante los aforos, tomas de presión y mediciones	Si
Al usuario en la entrevista	

##### Mediciones en el cabezal

Gasto entregado (l/s)	7.77
Presión antes de los filtros (kg/cm <sup>2</sup> )	No se registró
Presión después de los filtros (kg/cm <sup>2</sup> )	1 Kg/cm <sup>2</sup>

##### Mediciones en la sección de riego evaluada

Longitud de distribuidor (m)	15
Número de regantes en el distribuidor	9
Espaciamiento entre regantes (m)	1.75
Espaciamiento entre emisores (m)	0.15
Presión de la UCA (kg/cm <sup>2</sup> )	0.7
Número de secciones en el invernadero	8
Número de secciones regadas simultáneamente	8
Superficie total regada simultáneamente en el INVERNADERO m <sup>2</sup>	3500

##### Especificaciones del emisor

Gasto (L/H) por emisor	No se tiene
Gasto (L/H) por metro de línea de riego	No se tiene
Presión óptima de trabajo (kg/cm <sup>2</sup> )	No se tiene

Concepto	Valores				Promedio
	Línea 1 ( 1 )	Línea 2 ( 3 )	Línea 3 ( 6 )	Línea 4 ( 9 )	
Regantes de prueba ( No. )					
Distancia de la UCA a la línea de prueba (m)	1.00	4.50	9.75	15.00	7.56
Longitud de la regante (m)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Número de emisores por línea	166	166	166	166	166

**AFORO DE LA SECCION No. 1 DEL SISTEMA DE RIEGO DEL INVERNADERO**

Línea aforada No.1 regante inicio								
	Punto Inicio		Punto 1 / 3 (L)		Punto 2 / 3 (L)		Punto final	
	Línea A (ml)	Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)	Línea A (ml)	Línea B (ml)
Tiempo de emisión minutos 52	865	1155	2765	800	797	790	295	860
Aforo promedio mm	1010.0		1782.5		793.5		577.5	
Promedio gasto (l/h)	1.165		2.057		0.916		0.666	
Presión(kg/cm2)	0.7	0.65					0.61	0.51
Línea aforada No. 2 regante 1/3								
Tiempo de emisión minutos 52	400	985	800	1050	795	785	100	775
Aforo promedio mm	692.5		925.0		790.0		437.5	
Promedio gasto (l/h)	0.799		1.067		0.912		0.505	
Presión(kg/cm2)	0.54	0.54					0.49	0.55
Línea aforada No. 3 regante 2/3								
Tiempo de emisión minutos 52	987	810	785	780	770	770	1060	1150
Aforo promedio mm	898.5		782.5		770.0		1105.0	
Promedio gasto (l/h)	1.037		0.903		0.888		1.275	
Presión(kg/cm2)	0.53	0.53					0.45	0.5
Línea aforada No. 4 regante final								
Tiempo de emisión minutos 52	890	902	780	698	505	838	0	0
Aforo promedio mm	896.0		739.0		671.5		0.0	
Promedio gasto (l/h)	1.034		0.853		0.775		0.000	
Presión(kg/cm2)	0.52	0.52					0.5	0.41

## **2. PARCELA EXPERIMENTAL SOBRE LA TÉCNICA DE SURCOS ALTERNOS DE RIEGO PARCELARIO**

### **2.1. INSTALACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL CON SURCOS ALTERNOS**

#### **Resumen**

Actualmente la disponibilidad del agua para riego en los distritos es escasa, y el aprovechamiento se considera deficiente, debido a que se presentan grandes pérdidas de agua en la conducción y aplicación del agua. Lo anterior, hace necesario la búsqueda de nuevas alternativas de aplicación del riego que permitan optimizar el uso del agua en la parcela y una de ellas es en riego por surcos alternados y flujo intermitente. Bajo este contexto, se planteó la evaluación de una implementación de una parcela experimental con un cultivo regado mediante surcos alternos y flujo intermitente; en donde se encontró que estas alternativas representan una buena iniciativa para eficientar el uso del agua y además permite mejor el rendimiento del sorgo comparado con la forma tradicional de riego del productor.

#### **Introducción**

Actualmente la disponibilidad del agua para riego en los distritos es escasa, y su aprovechamiento se considera deficiente, ya que se presentan grandes pérdidas de agua en la conducción y aplicación del agua en la parcela.

Considerando anterior, se hace necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de aplicación del riego que permitan optimizar el uso del agua en la parcela y una de ellas es riego por surcos alternados o por flujo intermitente. Bajo este contexto, se planteó el estudio sobre la evaluación de una parcela experimental con un cultivo regado mediante surcos alternos y flujo intermitente.

#### **Objetivo**

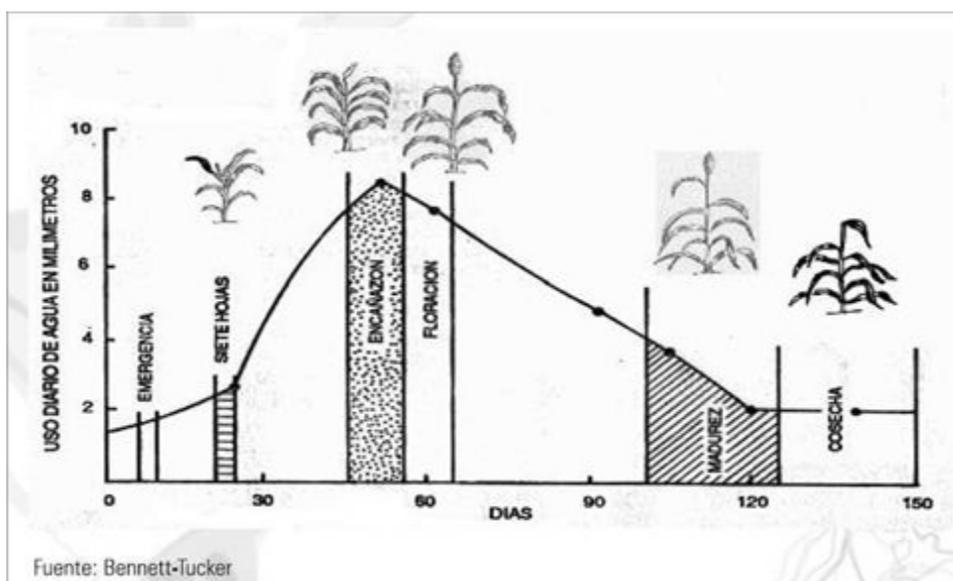
Determinar la respuesta del cultivo de sorgo a la aplicación de riego por surcos alternados y flujo intermite en suelos arcillosos del Valle del Yaqui.

##### **2.1.1. Revisión Bibliográfica**

La cantidad de agua requerida por la planta depende de: temperatura, humedad ambiental, tipo de suelo y ciclo vegetativo del híbrido, la aplicación del riego debe ser en forma oportuna, ya que si no se hace en el momento adecuado, dependiendo del período

vegetativo, puede reducir el rendimiento entre un 20 o 30 por ciento (Inifap-Cirno-Cevap, 2000).

El Sorgo Granífero, así como los demás cultivos, consume la mayor cantidad de agua durante el período de encañe y floración. Un estrés, por falta de agua en esos períodos, ocasionará una disminución en los rendimientos. En el Dibujo 2.1 se observa la relación entre el ciclo y el uso de agua del cultivo (Chessa, *et al*, 2001).



**Dibujo 2.1.** Relación entre mm de agua utilizados y el ciclo del cultivo.

Por otro lado, la aplicación del agua al suelo se puede realizar por diferentes sistemas de riego, sin embargo el sistema más utilizado es el riego por gravedad. Actualmente, es considerado como uno de los métodos que desperdicia grandes cantidades de agua en la aplicación a la parcela, tanto por escurrimiento superficial como por percolación profunda.

Con la finalidad de mejorar el uso del agua en estos sistemas, existen varias alternativas para de aplicación en la parcela, entre ellas se encuentra el riego por surcos alternados.

El riego alternado es aquel donde la aplicación de agua se realiza por un surco dejando el adyacente sin regar. De esta forma se reduce la mitad de la superficie irrigada de la parcela, lo que disminuye las pérdidas de evaporación directa del suelo, y en menor grado las perdidas por transpiración lo que permite el ahorro de agua, mientras que el impacto negativo en el rendimiento es mínimo (Stone y thacker 1989 citado por Figueroa et al 2003).

Durante la aplicación del riego en riegos alternados el avance es más lento, lo que permite aumentar el tiempo de riego y mejorar la uniformidad de distribución, sin embargo la dosis de agua fue muy inferior al ser el doble de suelo que debe humedecer el surco regado, lo

que hace evidente que durante todo el ciclo del cultivo se requiere de aplicar riegos más frecuentes lo que pudiera ser un problema para el productor (Arbat et al 2009).

## 2.1.2. Materiales y método

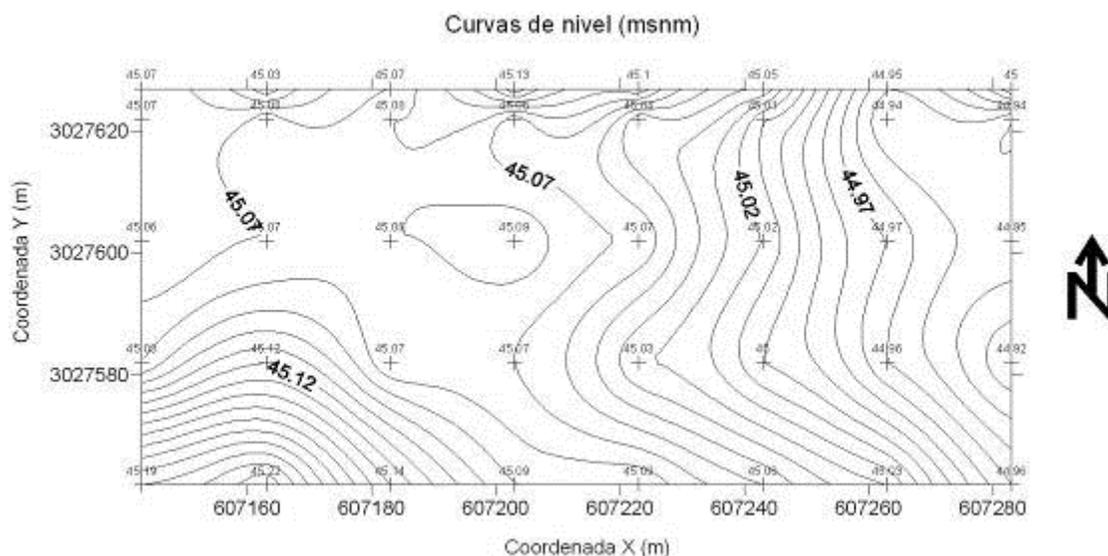
### 2.1.2.1. Descripción del sitio de estudio

El trabajo experimental se realiza a campo abierto, con el sistema de riego por gravedad, en las instalaciones del Centro Experimental y Transferencia de Tecnología (CETT-910) del Instituto Tecnológico de Sonora, situado en el block 910 del Valle del Yaqui, Cd. Obregón, Sonora, durante el ciclo productivo primavera-verano 2011.

El suelo donde se desarrolla el experimento es del tipo arcilloso compactado, el cual se preparo para el establecimiento del experimento con dos rastreos cruzados, tabloneo, trazo de surcos, canales y drenes La parcela consiste en 72 surcos, donde cada surco tiene una longitud de 123m y un ancho de 0.8m, resultando una superficie de 7084 m<sup>2</sup>. En la Ilustración 2.1 se presenta el levantamiento topográfico del campo donde se puede observar que el terreno tiene una pendiente de este a oeste de 0.3% y es el sentido del riego.

El cultivo utilizado es sorgo, el híbrido Ambar de Monsanto, el cual es recomendado por Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para el ciclo primavera-verano en el Valle del Yaqui. La siembra se realizó el día 1 de marzo del 2011 con una sembradora que arrojaba alrededor de 28 semillas por metro línea.

El manejo del cultivo se realiza de manera convencional acorde al esquema que utilizan los productores de la región del Valle del Yaqui, utilizando una fertilización base de 200-100-00 NPK seguido de aportaciones nitrogenadas de 50 y 30 kg de Nitrógeno en la etapa de floración y llenado de grano respectivamente. Por otra parte en etapas tempranas se realizan aplicaciones para el control de malas hierbas, como el 2,4 D amina a dosis de  $\frac{3}{4}$  de lt/ha, y para el control de gusano cogollero el Lorsban 1lt/ha y Rimon a 100 ml/ha.



**Ilustración 2.1.** Levantamiento topográfico de la parcela experimental de sorgo.

### 2.1.2.2. Diseño experimental

Se están evaluando 7 tratamientos en sorgo (Cuadro 2.1):

**Cuadro 2.1.** Control de tratamientos evaluados.

Tratamientos	Lámina de riego (cm)
1	Testigo
2	Riego alternado por el mismo surco y 1.1 tr.
3	Riego alternado por surcos diferente y 1.1 tr.
4	Riego alternado por el mismo surco y 1.5 tr
5	Riego alternado por surcos diferente y 1.5 tr.
6	Optimo

Los tratamientos están distribuidos en la parcela, de 10 surcos cada uno. Para la toma de dato se va a dividir 4 secciones, donde cada sección representa una repetición. En total son 4 repeticiones por tratamiento, donde cada unidad experimental estará conformada por 5 metros cuadrados; y los resultados se analizarán por el diseño de parcelas anidadas.

### 2.1.2.3. Variables medidas de riego

#### a) Aplicación de agua por tratamiento de riego

En cada riego de auxilio se tomó el tiempo de inicio y término, así como el gasto aplicado por sifón para calcular la lámina de riego aplicada. Durante el riego se midió el tiempo de avance por secciones y la recesión para obtener las curvas de avance y recesión y determinar su distribución en lo largo del surco. También se registró la humedad del suelo antes y después del riego para determinar el almacenamiento en el suelo.

#### b) Respuesta del cultivo a los tratamientos de riego.

La respuesta del cultivo se evaluó a través de las variable de desarrollo fenológico y de rendimiento del cultivo.

#### c) Altura de planta

Se midió durante el crecimiento del cultivo cada semana con las ayuda de una cinta métrica desde la base del tallo hasta la última hoja completamente desarrollad.

#### d) Número de panojas

Se medirá la cantidad de panojas desarrolladas por repetición con un muestreo en los 3 surcos centrales del tratamiento, en un intervalo lineal de 3m de longitud, cosechándose el área de la panoja de la hoja bandera hacia la zona que contiene la panícula, con un total de 4 repeticiones por tratamiento a una distancia de 40m entre repeticiones.

#### e) Peso volumétrico de raíz

Se evaluó el peso volumétrico de raíz con el fin de evaluar la cantidad de raíz. El muestreo fue procesado de acuerdo a la técnica de cálculo de volumen por diferencias en el desplazamiento de agua en probeta.

#### f) Rendimiento

Se muestro el contenido de grano en la panícula, cosechando el contenido de panojas en un área lineal de 3m por surco en un total de 3 surcos centrales por tratamiento, con un total de 4 repeticiones por tratamiento. Al cosechar las panojas se procede al desgrane de muestras y posteriormente al ajuste de humedad al 14% de contenido de tal, para la cuantificación del rendimiento promedio de toneladas por hectárea (ton/ha).

## g) M<sup>3</sup> / Kg de sorgo.

Se determinó dividiendo el volumen de agua utilizado por ha por kg/ha.

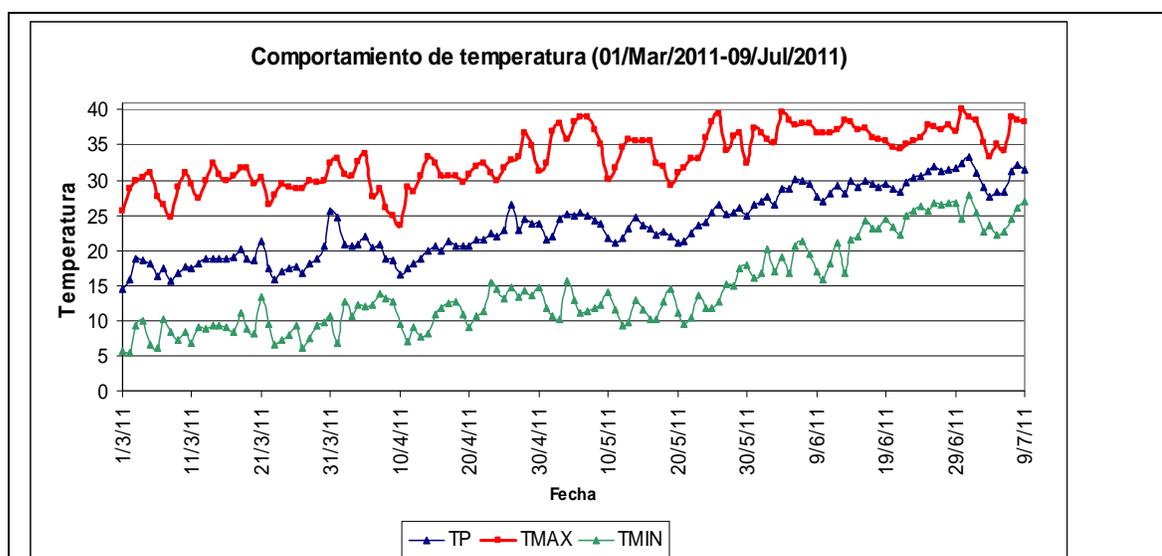
### 2.1.2.4. Análisis estadísticos

El análisis de varianza se realizó de acuerdo al diseño de parcelas anidadas, donde se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHIC plus (Versión 5.1). para determinar nivel de significancia al  $\alpha=0.05$ .

### 2.1.3. Resultados

#### 2.1.3.1. Comportamiento de las variables climáticas durante el periodo de estudio

En la figura 2. Se presenta la variación de la temperatura durante el periodo de desarrollo del experimento, donde se puede observar que promedio se mantuvo en condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo; ya que el sorgo requiere temperaturas altas para su desarrollo normal, siendo por lo tanto más sensible a las bajas temperaturas que otros cultivos. Para la germinación necesita una temperatura de suelo no inferior a los 18 °C y el crecimiento de la planta no es verdaderamente activo hasta que se sobrepasan los 15 °C, situándose el óptimo hacia los 32 °C. (Productos agri-nova. science).

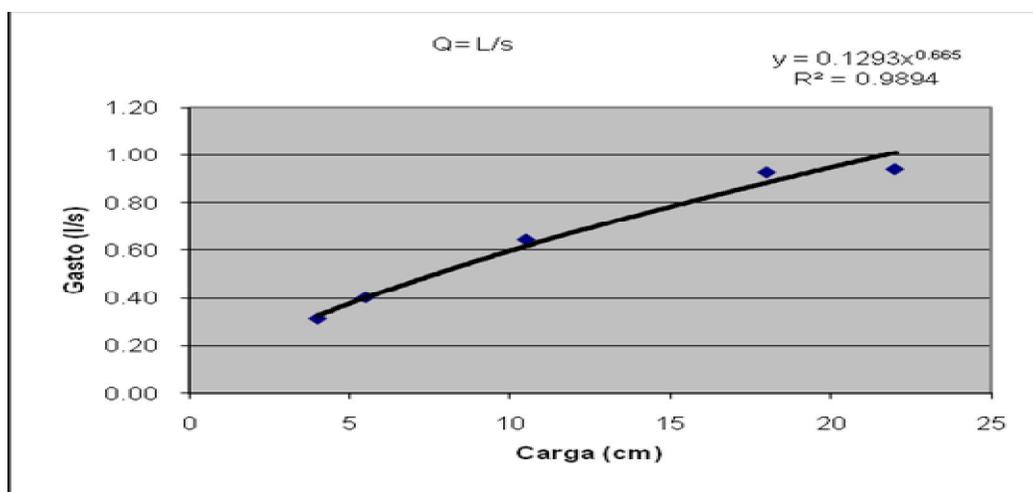


N

**Ilustración 2.2.** Comportamiento de las variables climáticas en el periodo de desarrollo del cultivo de sorgo en Valle del Yaqui.

### 2.1.3.2. Aplicación de agua en los tratamientos de riego

En la ilustración 2.3 Se presenta la curva de carga – gasto del sifón de 1 ½ pulgadas de diámetro; la cual fue utilizada para ajustar el gasto de aplicación por surco regado.



**Ilustración 2.3.** Curva de carga – gasto del sifón.

### 2.1.3.3. Lámina de riego aplicado por tratamientos

La aplicación de riego por tratamiento se evaluó en base al tiempo de riego, gasto por sifón y área regada, (cuadro 2.2). Las láminas que se presentan son la del riego de siembra y los 4 riegos de auxilio.

Los resultados presentados, demuestran que todos los tratamientos se aplicó menor lamina que el testigo; donde el riego intermitente es menor en un 26.5%, el optimo en un 16.33 %y el alternados con 1.5 tr en un 28.5%. Lo anterior es afirmado Figueroa et al 2003. Donde menciona que con el uso de los riegos alterarnado se puede eficientar hasta 22.1% el uso del agua comparado con el riego continuo.

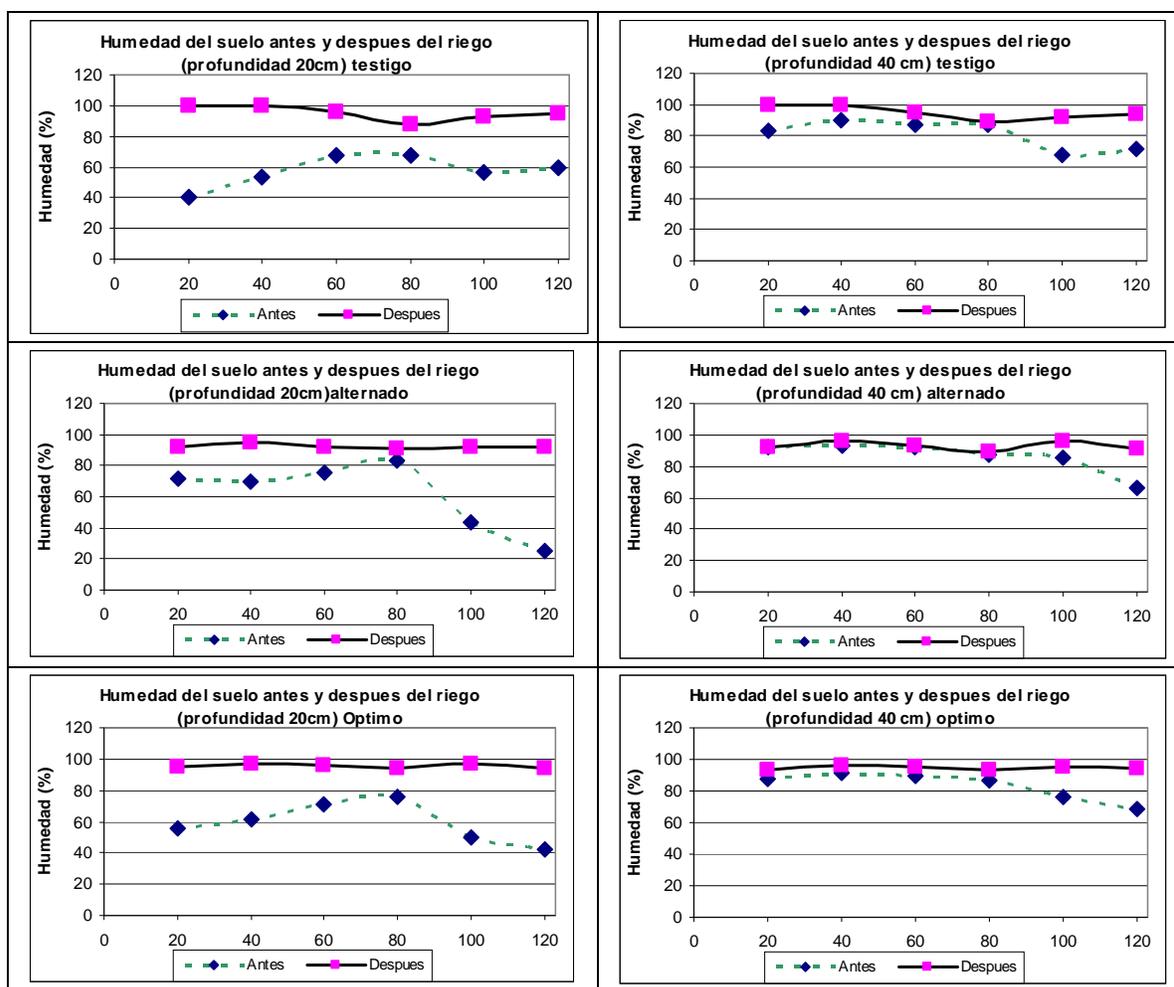
**Cuadro 2.2.** Lámina de riego aplicada por tratamientos de riego.

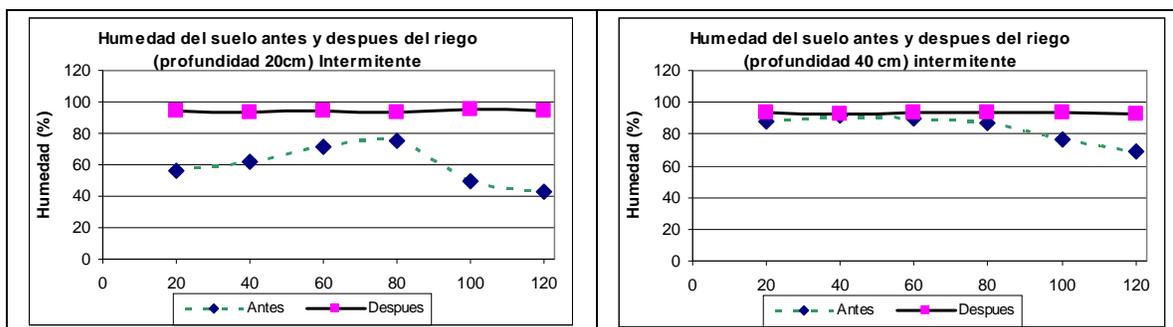
No.	Tratamientos	Lámina siembra en seco	Lámina riegos de auxilios	Lámina total de riego por tratamiento	Diferencia de tratamiento vs testigo (%)
1	Testigo	12	37	49	-----
2	Riego alternado - mismo surco y 1.1 tr.	12	16	28	42.86
3	Riego alternado -surcos diferente y 1.1 tr.	12	16	28	42.86

No.	Tratamientos	Lámina siembra en seco	Lámina riegos de auxilios	Lámina total de riego por tratamiento	Diferencia de tratamiento vs testigo (%)
4	Riego alternado - mismo surco y 1.5 tr	12	23	35	28.57
5	Riego alternado - surcos diferente y 1.5 tr.	12	23	35	28.57
6	Optimo	12	29	41	16.33

#### 2.1.3.4. Distribución de humedad en el suelo por tratamiento

La evaluación de la distribución de agua por tratamiento de riego se realizó con el muestreo antes y después del riego. Los resultados se presentan en la Ilustración 2.4.



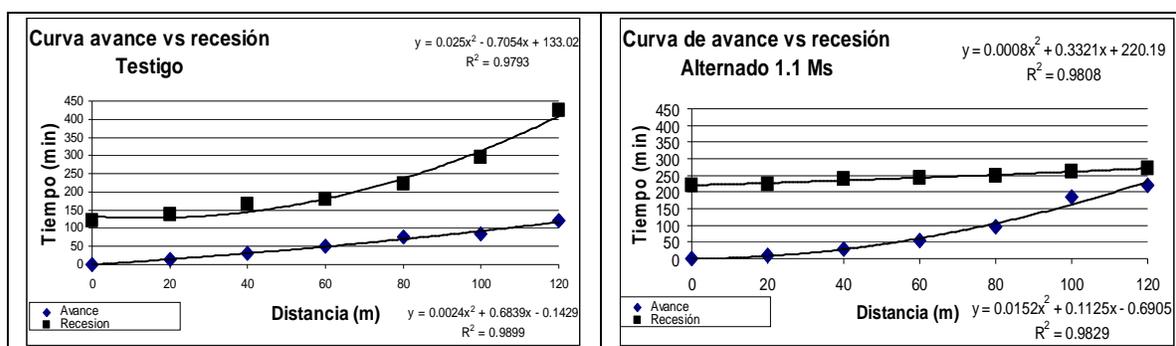


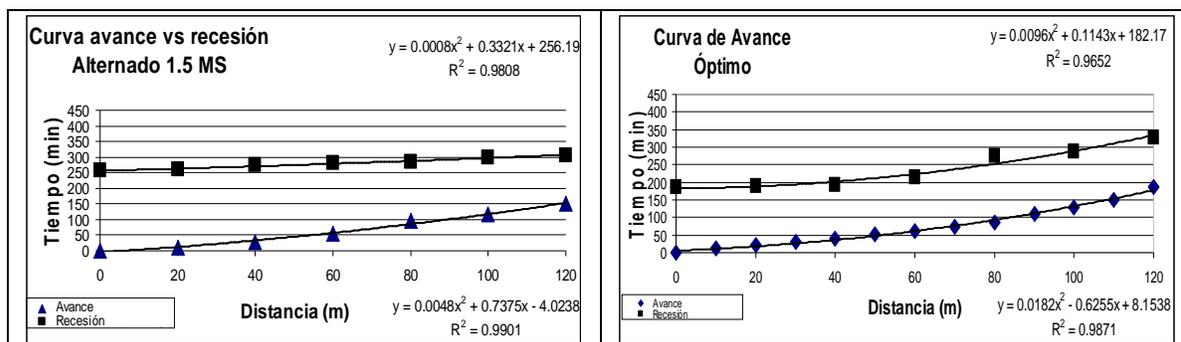
**Ilustración 2.4.** Registro de humedades antes y después del riego por tratamiento a dos profundidades (20 y 40 cm).

El muestreo se realizó en el surco central, en la hilera del cultivo, encontrándose que en todos los tratamientos se aplicaron de manera uniforme en toda la longitud del surco, y además se logró llevar el suelo a una humedad disponible alrededor del 100%. Lo anterior permite concluir que la diferencia en láminas de riego aplicadas no se reflejara en la disponibilidad de agua en el suelo, y por lo tanto no afectará el desarrollo del cultivo.

### 2.1.3.5. Curvas de avance y recesión por tratamiento.

La aplicación del riego en cada uno de los tratamientos se evaluó con la medición de avance y recesión de agua en los surcos por tratamientos, los cuales se pueden observar en la Ilustración 2.5.





**Ilustración 2.5.** Curvas de avance y recesión para los tratamiento dentro del tercer riego de auxilio.

En la figura 2.5 se observa que en el tratamiento de riego intermitente se logra el avance más rápido comparado con los otros tratamientos, y la recesión es más uniforme; lo que indica que se mantiene el surco con agua y mayor tiempo de oportunidad para lograr mejor distribución de la humedad en el suelo. Este comportamiento coincide con Fuentes 1998, y Grassi 1980, donde menciona que la intermitencia permite circulación del agua con mayor rapidez, consiguiendo mayor uniformidad en el tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo. En el caso del testigo se logra un avance muy rápido debido al gasto de aplicación, pero la recesión indica que la distribución es muy variable, En cuanto al tratamiento óptimo y el alternado con 1.5 se logra una mejor distribución y mayor tiempo de oportunidad para el almacenamiento de agua en el suelo.

### 2.1.3.6. Análisis de las variables respuesta del cultivo

#### a) Altura de planta

La altura de planta alcanzada por tratamiento de riego, no presentó diferencia significativa, lo cual indica que esta variable no se vio afectada por la dinámica de aplicación de los tratamientos de riego.

**Cuadro 2.3.** Altura de planta de sorgo bajo tratamientos de riego.

Tratamientos	Media (m)
Testigo	1.21
Alternado 1.5 Surco diferente	1.19
Óptimo	1.18
Alternado 1.1 Mismo surco	1.17
Alternado 1.1 Surco diferente	1.17
Alternado 1.5 Mismo surco	1.16

#### b) Número de panojas

El análisis de varianza de panojas presenta diferencia altamente significativa, donde los tratamientos de surcos alternado 1.5 fueron los mejores estadísticamente, lo cual repercute en un mejor rendimiento.

**Cuadro 2.4.** Numero de panojas de sorgo en los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Media	Panojas /m <sup>2</sup>	Comparación de medias
Alternado 1.5 Surco diferente	132.75	18.4	a
Alternado 1.5 Mismo surco	95.25	13.2	bc
Alternado 1.1 Surco diferente	92.25	12.8	bc
Óptimo	82.25	11.4	c
Testigo	73.75	10.2	c
Alternado 1.1 Mismo surco	72.25	10.0	c

#### c) Peso volumétrico de raíz

El análisis de varianza realizado en el volumen de raíces, arrojó diferencia altamente significativa entre tratamientos, donde riego óptimo, alternados 1.5 y testigo presentaron mayor volumen de raíces, los cuales pueden haber repercutido en la mayor producción del cultivo.

**Cuadro 2.5.** Peso del volumétrico de raíz en sorgo para los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Media	Comparación de medias
Óptimo	0.047	a
Testigo	0.045	ab
Alternado 1.5 Mismo surco	0.041	ab
Alternado 1.5 Surco diferente	0.039	abc
Alternado 1.1 Surco diferente	0.038	bc
Alternado 1.1 Mismo surco	0.032	c

#### d) Rendimiento

El análisis de varianza realizado a rendimiento total arrojó que hay diferencia altamente significativa entre tratamientos, donde los mejores tratamientos fueron alternados con 1.5 tiempo y el óptimo, (cuadro 2.6) comparado con el testigo y los surcos alternados con 1.1 de tiempo. Estos rendimientos superan a los obtenidos por varios investigador que reportan rangos de 3.1 a 5.9 ton/ha. (Ferreira y cols, 2008; Clará y cols, 2010; Cordes 2010; Armah y cols, 2002, Funaro y cols, 2008). Estos resultados se deben a una mejor distribución del agua en el terreno, lo cual benefició a las variables vinculadas el rendimiento, como mayor número de panojas, y volúmenes de raíces.

**Cuadro 2.6.** Rendimiento total de sorgo obtenido en los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Media	Comparación de medias
Alternado 1.5 Mismo surco	6.64	A
Alternado 1.5 Surco diferente	6.11	Ab
Óptimo	6.06	Ab
Alternado 1.1 Mismo surco	5.36	Bc
Testigo	4.71	Bc
<b>Alternado 1.1 Surco diferente</b>	<b>4.35</b>	<b>C</b>

#### 2.1.4. Conclusiones

1. El riego alternado de 1.5 y el óptimo presentaron la mejor respuesta en cuanto a rendimiento total en sorgo comparado con el testigo.
2. La necesidad de agua por kg de sorgo fue mejor en riego alternados de 1.5 y 1.1 en el mismo surco.
3. Con el uso del riego en surcos alternados se logra un ahorro de agua del 26.5 al 2.5% comparado con el testigo.

## 2.2. ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA CON SURCOS ALTERNOS

Con la finalidad de evaluar la eficiencia de uso del agua por la planta en cada uno de los tratamientos evaluados, se determinó  $M^3$  por kg de grano, parámetro que también es conocido como productividad del agua. Donde se puede observar que todos los tratamientos superaron al testigo. Siendo los mejores los alternados de 1.5 mismo surco y alternado 1.1 mismo surco.

<i>Tratamiento</i>	<i>M<sup>3</sup>/kg</i>
Alternado 1.5 Mismo surco	0.53
Alternado 1.5 Surco diferente	0.57
Óptimo	0.68
Alternado 1.1 Mismo surco	0.52
Testigo	1.04
Alternado 1.1 Surco diferente	0.64

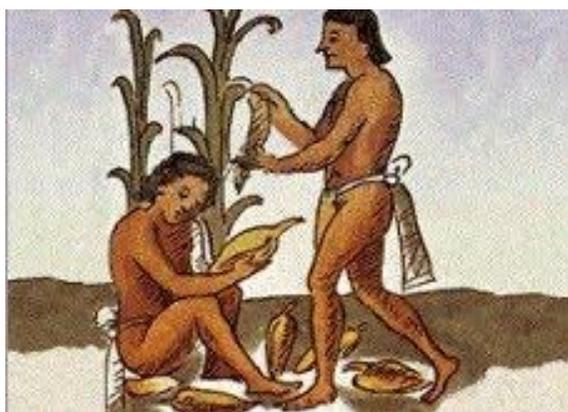
Los resultados de volumen de agua por kg de sorgo superan los resultados presentados por Inifap 2001 citado Martínez (2007) donde menciona que se requiere de 1.3 a 1.8  $m^3/kg$  de grano. También es superior a los obtenidos por Lesur L. 2006, ya que mencionada que se requiere de 0.9  $m^3/kg$  de grano y en los tratamientos alternados 1.5 e intermitente entre 0.52 y 0.53  $m^3/kg$  de grano, lo que representa hasta un 42% en ahorro de agua por cada kg de grano producido.



### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE CULTIVOS MEJORADOS GENÉTICAMENTE PARA RESISTIR EL DÉFICIT HÍDRICO

#### Introducción

La agricultura y la mejora del material vegetal surgieron simultáneamente con la domesticación de los primeros cultivos (Ilustración 3.1.). El proceso de domesticación trajo consigo una serie de cambios (eliminación de la dormancia y los mecanismos de dispersión de la semilla, floración y maduración agrupadas, aumento en el tamaño de las semillas y frutos, etc.) asociados a la adaptación de los cultivos a nuevos ambientes modificados por el hombre (Nuez y Pico, 1998).

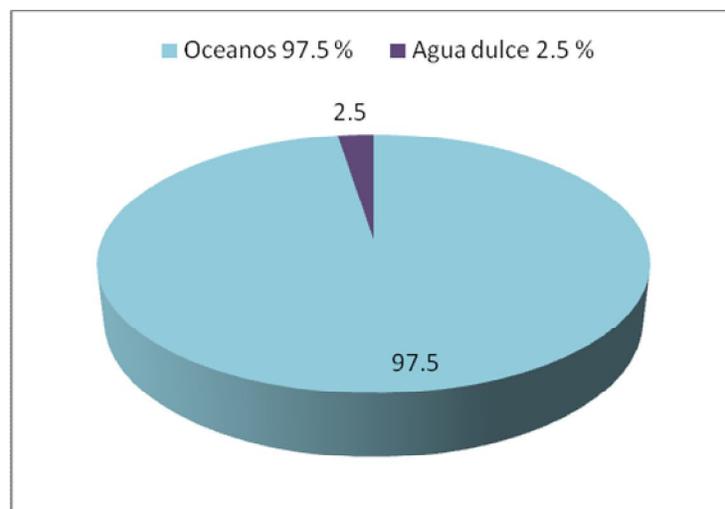


**Ilustración 3.1.** Domesticación de los cultivos en Mesoamérica.

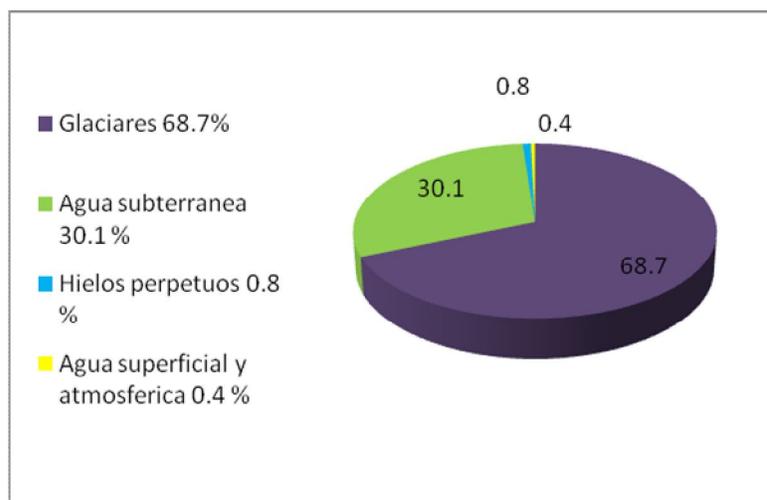
El primer agricultor se comportaba como un mejorador, aprovechando la variabilidad existente. La selección realizada por estos primeros agricultores de manera consciente o inconsciente, fue presumiblemente una selección masal. Este proceso prosiguió, sin una verdadera fundamentación científica, hasta fechas muy recientes. La selección continuada durante milenios nos ha proporcionado un conjunto de variedades locales de buena calidad adaptadas a distintas zonas (Nuez y Pico, 1998).

En los próximos 50 años la evolución de la sociedad humana a través del incremento de la población, la mejora en la calidad de la dieta consumida y las crecientes necesidades energéticas a través de los biocombustibles demandarán un aumento en la producción de cereales (FAO, 2004). Por otro lado el cambio climático global sugiere un incremento en la demanda de agua (Petit *et al.* 1999). La población mundial se duplicará para el año 2050, haciendo de la seguridad alimentaria el principal desafío para el próximo milenio. La producción de alimentos tendrá que duplicarse o, preferentemente, triplicarse para el año 2050, para satisfacer las necesidades de la espera 11 billones de personas, de los cuales el noventa por ciento residirá en los países en desarrollo del mundo (Herrera, 1999).

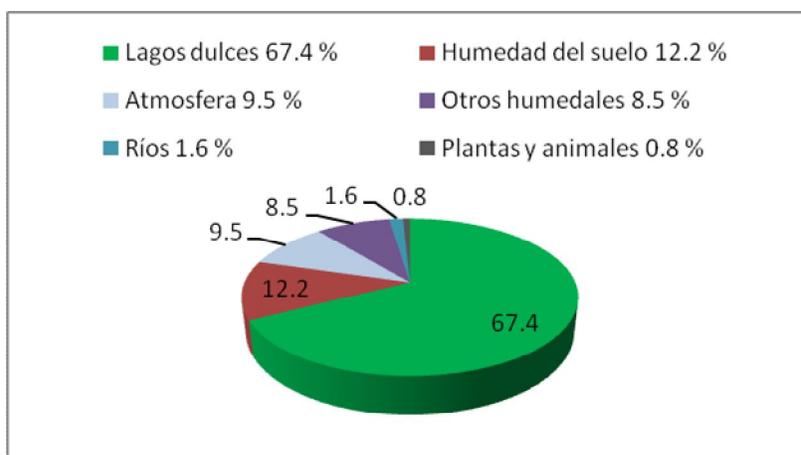
De acuerdo con la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO, 2002), el planeta tiene aproximadamente 1400 millones de km<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, después de restar el agua salada de los océanos y el agua dulce congelada en las capas de hielo, sólo alrededor de 9,000-14,000 km<sup>3</sup> de agua dulce es potencialmente disponible para uso humano (Ilustraciones 3.2., 3.3. y 3.4.).



**Ilustración 3.2.** Cantidad total de agua en el mundo.



**Ilustración 3.3.** Distribución del agua dulce en el mundo.



**Ilustración 3.4.** Distribución del agua superficial y atmosférica.

Siendo la agricultura el mayor usuario de agua dulce en el mundo y la oferta de este recurso cada vez más escasa se requieren de sistemas de cultivos con altos niveles de eficiencia en el uso del agua (Ilustración 3.5.) (Debaeke y Aboudrare, 2004). El éxito de la producción agrícola depende crucialmente de la disponibilidad de agua. Más del 80% de las tierras de cultivo mundial es de secano, sin embargo las tierras agrícolas con riego constituyen alrededor del 16 % del total y estas producen alrededor del 40 % del alimento del mundo (Gitay et al., 2001). La agricultura en la actualidad utiliza más del 70% (86% en los países en desarrollo) de agua dulce disponible (Cominelli y Tonelli, 2010, Cominelli et al. 2009).



**Ilustración 3.5.** El agua, necesaria para la agricultura.

La enormidad del desafío es significativamente incrementado por la menor disponibilidad de agua y el hecho de que este alimento adicional tendrá que ser producido en la agricultura existente en la tierra o en regiones consideradas como suelos marginales, si queremos para preservar las zonas forestales y el medio ambiente en su conjunto (Herrera, 1999).

La investigación agrícola y las mejoras tecnológicas, seguirán siendo necesarias para aumentar la productividad agrícola. Hay muchas maneras en las que la productividad agrícola se puede aumentar de manera sustentable, incluyendo el uso de fertilizantes biológicos, mejora del control de plagas del suelo y la conservación del agua, y el uso de variedades mejoradas de plantas, producido por medios tradicionales o biotecnológicos. De estas aplicaciones biotecnológicas, las variedades de plantas transgénicas, sea probablemente el método más prometedor para aumentar la producción agrícola y la productividad, cuando estén integrados en tradicionales sistemas (Herrera, 1999).

Una estrategia para mejorar la eficiencia en el uso del agua en los cultivos es la selección de cultivares con tolerancia a sequía (Andrade *et al.* 1996; Bänziger *et al.* 2000).

### **3.1. HERENCIA DE LOS CARACTERES ADQUIRIDOS**

En 1809 el naturalista francés Jean Baptiste de Lamarck publica un libro “*Philosophie Zoologique*”, en el que nos da una explicación de la evolución basada en la herencia de los caracteres adquiridos. Para Lamarck el carácter adquirido correspondía a aquellas modificaciones de la estructura que ocurren durante la vida de la planta o del animal causado por influencias ambientales. Lamarck creía que cualquier rasgo adquirido durante el desarrollo de una planta o de un animal sería heredado por su descendencia, y que tales cambios eran acumulativos de una generación a otra. Lamarck afirmaba que un cambio en el medio provoca un cambio en las necesidades del organismo. Estas nuevas necesidades conducen al desarrollo de nuevos organismos como resultado de los esfuerzos desplegados por el organismo. La explicación del desarrollo de nuevos órganos, o de la pérdida de algunos caracteres, se basa en la teoría del “uso y desuso”. Los resultados de los cambios ocurridos en el curso de la vida de un individuo, o sea, la adquisición de partes nuevas y su desarrollo por el uso o la pérdida por desuso se transmitirán a la descendencia de aquellos individuos que sufrieron tales cambios. Según Lamarck el ambiente no es el que moldea directamente las especies, sino que influye en la dirección de la evolución, modificando las necesidades del organismo, las que, a su vez, estimulan la formación de órganos nuevos, el uso más activo de los órganos ya existentes o la desaparición de las partes que ya no se utilizan (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.1. Variación

No hay dos individuos que provenientes de los mismos padres, sean exactamente idénticos, aún cuando vivan en la misma localidad. Darwin observó, también que algunas variaciones eran transmitidas y otras no; pero, desconociendo los mecanismos hereditarios descubiertos más tarde, no pudo reconocer los dos tipos, básicamente distintos, de variaciones: el heredado y el producido por el ambiente y, por lo tanto, no transmitido de una generación a otra (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.2. La lucha por la existencia

El crecimiento normal de una población se realiza en progresión geométrica. Los cálculos demuestran que si toda la descendencia de cualquier especie sobrevive y vuelve a reproducirse, esta especie llegará a poblar la tierra en sólo unas cuantas generaciones. Si consideramos por ejemplo, que una planta produce 100 semillas que dan origen a 100 plantas en la estación de crecimiento siguiente, que cada una de estas produce también 100 semillas, al final de la octava estación de crecimiento consecutivo habrá cien billones de plantas maduras, todas descendientes directas de la primera planta (Wilson y Loomis, 1980).

Debido a los coeficientes de reproducción tan elevados de las plantas y a su consiguiente superproducción, sólo sobrevivirán una determinada proporción de hijos. Esta supervivencia diferenciada es el resultado de lo que Darwin denominó “La lucha por la existencia”. La supervivencia de una especie depende de la reproducción realizada a pesar de los efectos desfavorables del ambiente en su totalidad, que comprende no sólo los factores climáticos y edafológicos, como temperaturas extremas y sequía, si no también, la acción de otros organismos, entre ellos los rapaces y los parásitos. Los animales tienden a agotar su provisión de alimentos y, con frecuencia, las plántulas crecen en condiciones tales, que sólo las más vigorosas sobreviven. Pero, si a pesar de todas las fuerzas destructoras, el número de descendientes equilibra o excede el número de muertes, entonces, la supervivencia de la especie parece estar asegurada (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.3. Selección Natural

Puesto que los organismos se encuentran expuestos a fuerzas adversas en condiciones naturales, sólo aquellas variantes genéticas que estén mejor adaptadas a las condiciones predominantes en una población serán las más aptas para sobrevivir. Muchas de las variantes, dentro de una especie o entre especies, no tienen ningún valor conocido para el organismo, pero las hay que son letales y otras que son ventajosas, es decir que presentan un valor de supervivencia. Las variaciones en el color de la flor, forma de la hoja o tamaño del fruto, pueden no tener importancia para la planta. En cambio, una deficiencia de la clorofila en las hojas es causa de menor elaboración de alimentos, crecimiento más

lento e incapacidad para sobrevivir. Aún los individuos que poseen variaciones ligeramente desfavorables podrán ser eliminados; una pérdida, aparentemente sin consecuencias, en la eficiencia puede ser fatal. Por otra parte, las variaciones que favorecen la polinización, que permiten el crecimiento en suelos pobres, o que mejoran la dispersión de las semillas o reducen los daños en el invierno, suelen tener un valor de supervivencia y las plantas con estos caracteres son más favorecidas que las que no los poseen (Wilson y Loomis, 1980).

En la población de cualquier especie habrá variantes que serán mejor adaptadas que otras a las condiciones ambientales, nuevas o ya existentes. Los descendientes de estos progenitores con variaciones favorables tenderán, según el grado en que hereden los genes en que radican estas variaciones, a sobrevivir y a reproducirse en mayor número que la prole de los deficientemente adaptados. Así al seguir una generación a otra, los individuos mejor adaptados serán representados cada vez más por una cantidad mayor de descendientes (Wilson y Loomis, 1980).

En resumen el ambiente tiende a seleccionar las formas que poseen variaciones beneficiosas y a eliminar aquellas cuyas variaciones son deletéreas. Darwin llamó a este proceso selección natural, en contraste con la selección artificial, efectuada por el hombre para mejorar algunas especies de plantas o animales domésticas. La selección artificial de plantas y animales en condiciones de domesticación ofrece pruebas en apoyo a la teoría de la selección natural (Wilson y Loomis, 1980).

#### *3.1.4. Polinización cruzada y autopolinización*

La reproducción sexual por sí misma no siempre produce la variabilidad genotípica sobre la cual actuará la selección para realizar el cambio evolutivo. Esta variabilidad es provocada principalmente, por la segregación y recombinación de genes que han existido desde hace ya mucho tiempo, o que han surgido recientemente por mutación. Se observa esta variabilidad en las poblaciones de especies cuya polinización es normalmente, o con frecuencia cruzada. Los numerosos caracteres estructurales y otros factores (como la incompatibilidad) que impiden la autopolinización son, por lo tanto, adaptaciones útiles, puesto que la polinización cruzada lleva consigo la heterocigosis y una mayor variación sobre la que ha de operar la selección (Wilson y Loomis, 1980).

Por otra parte en las plantas autopolinizadas puede existir una homocigosis casi completa. Al estudiar la autopolinización en el maíz, hemos visto que la autopolinización, en una población heterocigótica, reduce a la mitad el número de los individuos heterocigóticos y reduce a la mitad el número restante en cada generación sucesiva. En el estado homocigótico, los genes nocivos son eliminados, más o menos rápidamente, por la selección natural, y los individuos de la población se vuelven altamente uniformes. La reproducción sexual realizada por autopolinización rigurosa equivale entonces esencialmente a la reproducción vegetativa en lo tocante a la variación. En estas condiciones, los únicos cambios que ocurrirán serán los provocados por nuevas

mutaciones. La polinización cruzada es, con toda probabilidad, un estado ancestral a partir del cual fueron evolucionando las especies autopolinizadas, de manera independiente y siguiendo diferentes líneas evolutivas. La autopolinización no es perjudicial para las especies que normalmente son autopolinizadas y, en muchas plantas, hasta puede tener cierto valor para asegurar la supervivencia ya que la polinización ocurre más fácilmente en estas plantas que en las que dependen de la polinización cruzada. Es útil sobre todo en las plantas anuales. Si en las que normalmente son de polinización cruzada se impidiese la polinización durante una sola estación la totalidad de la raza podría extinguirse. Las especies de autopolinización estricta pueden florecer durante mucho tiempo, pero es de suponer que faltándoles la variabilidad irán muriendo si, al cambiar el ambiente, no pudieran propagarse a otros ambientes, pues carecen de nuevas combinaciones génicas que les permita adaptarse (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.5. Evolución y Adaptación

Como resultados de los procesos evolutivos, los organismos vivos acaban por adaptarse al ambiente que los rodea. El término *Adaptación* comprende los efectos de todos los caracteres, tanto externos como internos, que permiten que un organismo viva y se reproduzca en un ambiente dado. Dos procesos básicos hacen posible la adaptación:

- a) La mutación y la recombinación siguiente.
- b) La acción selectiva del medio sobre la variación hereditaria resultante.

Aunque las mutaciones aisladas representan un papel en la evolución, las combinaciones de genes son mucho más importantes. La recombinación de mutaciones no sólo proporciona una gran variedad de fenotipos, sino que también el valor de la mutación para una especie suele depender de los genes con quienes se asocia durante el cruzamiento, la segregación y la recombinación. De las combinaciones de genes resultantes, algunas serán más útiles que otras, y los organismos que poseen estas combinaciones favorables sobreviven y se reproducen más eficazmente que sus competidores con combinaciones menos favorables (Wilson y Loomis, 1980).

La mayoría de las mutaciones son nocivas y gran parte de las combinaciones génicas no son adaptativas. La adaptación implica cambios en un gran número de caracteres, y puesto que las mutaciones y recombinaciones son una cuestión de azar, es muy improbable que la apropiada combinación génica favorable pueda ocurrir sola por casualidad. Aún el proceso continuo de selección que elimina las combinaciones génicas presentes en el no apto, las que dejan menos descendientes que el apto no produce esta improbable combinación de caracteres que enseña al organismo adaptado. La eliminación de las combinaciones desfavorables de genes no asegura la presencia de combinaciones favorables (Wilson y Loomis, 1980).

La selección no sólo elimina al no apto, sino que en la evolución de la adaptación puede considerarse como un factor que será ora positivo, ora negativo. Esto se debe a que la

selección siempre actúa en una dirección, que es la de conservar los genes y las combinaciones génicas que mejoran la adaptabilidad (en el sentido de una reproducción más fructífera). Los porcentajes o frecuencias relativas, de tales genes tienden a aumentar en una población al seguir una generación a otra. Ahora bien; si aumenta la frecuencia relativa de estos genes, se observará también mayor tendencia hacia las combinaciones de estos genes en los individuos de dicha población. Estas combinaciones de genes favorables acrecientan la adaptabilidad, aún más de lo que lo aumentan los genes individuales dentro de las combinaciones. Por lo tanto, la selección actúa para promover el aumento de los individuos portadores de mutaciones y combinaciones de mutaciones que mejoran la adaptabilidad, poniendo a disposición de una selección ulterior lo mejor de estas combinaciones (Wilson y Loomis, 1980).

La evolución no es, entonces, un proceso casual y la adaptación, que es el logro culminante de la evolución tampoco es accidental. Ahora está claro que las mutaciones no ocurren con el fin de producir un efecto beneficioso sobre el organismo, ni tampoco son una reacción a una necesidad presente o prevista, o a requisitos de adaptaciones en un ambiente en particular. Los organismos no se adaptan con intención al ambiente; se adaptan si sus genes y sus combinaciones génicas favorables son conservados mediante la selección natural, al grado de volverse más eficaces para la reproducción en su ambiente (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.6. Aislamiento reproductor

Según este concepto, el origen de una nueva especie sería el resultado de la aparición de dos o más grupos de una especie ancestral de extensa distribución y de polinización cruzada. Si los miembros de cada grupo se reproducen entre sí, pero quedan al mismo tiempo aislados de otros grupos por barreras que impiden o restringen la hibridación, estos grupos podrán convertirse en una especie diferente (Wilson y Loomis, 1980).

El aislamiento reproductor suele ser precedido, por el aislamiento en el espacio, es decir, por una separación física de las poblaciones que puede ser debida a la distancia o a la ubicación de las diferentes moradas dentro de una misma área. El aislamiento espacial impedirá o reducirá la polinización cruzada, con su intercambio permanente de genes, favoreciendo, por lo tanto, el desarrollo de poblaciones genéticamente distintas unas de otras. Estas diferencias llegan a manifestarse tanto externa como internamente, al grado de poder considerar ya a dichas poblaciones como razas. Pero el aislamiento espacial por si solo es incapaz de producir nuevas especies; éstas surgirán únicamente cuando las razas aisladas hayan creado mecanismos reproductores que impiden o limitan la hibridación. Estos mecanismos de aislamiento reproductivo pueden ser internos o externos. Entre los externos figuran las estaciones de floración diferente y las modificaciones estructurales de la flor que hacen imposible la polinización cruzada entre las poblaciones. Los factores internos son: la falta de germinación de la especie extraña sobre el estigma, el crecimiento lento de los tubos polínicos de la otra especie en el estilo y la incapacidad de los cigotos híbridos para transformarse en embriones normales. La

acumulación de mutaciones que impiden o restringen el cruzamiento constituye, normalmente un proceso gradual que abarca períodos muy largos en el curso de la evolución (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.7. Hibridación

Los genetistas definen el híbrido como el resultado del cruzamiento entre dos individuos que difieren un uno o más pares de genes. En este sentido la polinización cruzada dentro de una especie produce plantas híbridas. Pero desde el punto de vista del origen de las especies, podemos definir al híbrido como el producto del cruzamiento entre individuos pertenecientes a especies distintas o a razas que quedaron aisladas anteriormente. A pesar de los mecanismos de aislamiento, los híbridos aparecen en la naturaleza, y su formación es mucho más frecuente de lo que solía pensar. Se encuentran numerosos híbridos entre los helechos, coníferas y plantas con flores. La hibridación de especies es importante en la producción de nuevos tipos de vida vegetal, aunque el papel que desempeña es probablemente menos importante que el del aislamiento en la reproducción (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.8. Poliploides

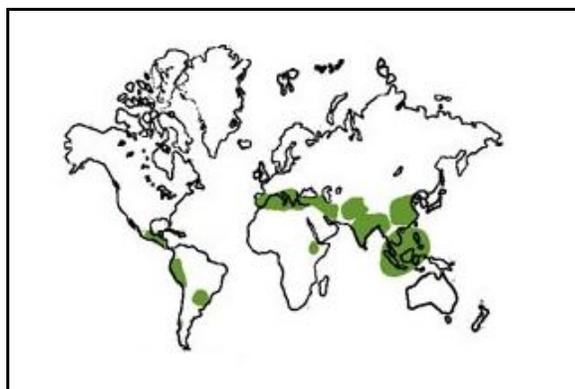
Cuando los núcleos de la población esporofítica contienen más de dos conjuntos completos de cromosomas, se trata de un estado de poliploidia. En las plantas poliploides puede haber tres, cuatro o más dotaciones de cromosomas; éstas se denominan triploides ( $3n$ ), tetraploides ( $4n$ ), pentaploides ( $5n$ ), hexaploides ( $6n$ ), etc., y generalmente los números cromosómicos son múltiplos de algún número haploide básico. El rigir de formas nuevas mediante la poliploidia se llama evolución cataclísmica. Los tetraploides son el tipo más común encontrado entre los poliploides. Surgen por duplicación del número cromosómico durante alguna de las fases del ciclo vital. Esta duplicación suele ocurrir espontáneamente, pero también puede ser provocada por un tratamiento artificial. Probablemente la causa más común de duplicación es la falta de meiosis normal en las células madre de esporas de un híbrido  $F_1$ , lo que dará gametos diploides ( $2n$ ). La unión casual de dos gametos de este tipo produce una planta tetraploide mientras que la fusión de un gameto diploide con otra haploide da origen a una planta triploide. La poliploidia es un fenómeno muy común en algunas algas y en cierto número de musgos, pero es poco frecuente en los hongos. También se observa en plantas vasculares, como los equisetos, helechos, coníferas y plantas con flores (Wilson y Loomis, 1980).

### 3.1.9. Importancia del mejoramiento vegetal

La domesticación de las plantas y la invención de la agricultura no fueron procesos generales, ni una fase obligatoria en la evolución de todos los grupos humanos, sino algo excepcional que sucedió en pocas partes del mundo e implicó la acumulación de conocimientos sobre la naturaleza por parte de las culturas aborígenes (figura 6) (Warman, 1995).

Las plantas son un grupo ampliamente estudiado en el campo de la biotecnología vegetal y en la actualidad existe una gran cantidad de plantas transgénicas producidas con diferentes fines (Sánchez, 2008).

Desde la aparición de la agricultura la humanidad ha seleccionado las plantas que le proporcionaban un mayor rendimiento en alimentos o materias primas necesarias para la obtención de numerosos productos útiles como drogas, medicinas, colorantes y especias. Los primeros agricultores aumentaban la producción guardando para la siguiente siembra las semillas de las plantas más deseables (Sánchez, 2008).



**Ilustración 3.6.** Domesticación de las plantas en el mundo.

Para maximizar el rendimiento es importante usar los procedimientos más eficaces y mejorar la calidad de sus cosechas. En este sentido, los máximos rendimientos se pueden obtener por la aplicación de prácticas culturales superiores. Sin embargo el incremento de la productividad de los cultivos no depende solo de la mejor aplicación de las prácticas culturales, sino también del uso de variedades mejoradas (Camadro, 2003).



**Ilustración 3.7.** Algodón transgénico.

El mejoramiento genético es un proceso lento y generalmente laborioso; sus avances dependen de la variabilidad genética (heredable) que el fitomejorador tiene a su disposición para llevar adelante el trabajo. El tiempo necesario para introducir un gen determinado en un cultivo depende de la fuente de ese gen y de la distancia evolutiva de la misma con respecto al cultivo (Camadro, 2003).

Las variedades mejoradas se obtienen mediante diferentes tecnologías de mejoramiento genético. El mejoramiento genético implica incrementar la expresión de uno o varios caracteres hereditarios de las plantas que sean de interés económico para el hombre (Camadro, 2003).

### 3.2. BIOTECNOLOGÍA

A principios del siglo XX, con el redescubrimiento de las Leyes de G. Mendel, las experiencias de Johansen y el desarrollo de los primeros híbridos en maíz, así como con el establecimiento de los modelos genéticos que explican el comportamiento de caracteres que muestran variación continua, se sientan las bases científicas de la mejora genética (Nuez y Pico, 1998).

La biotecnología aplicada al fitomejoramiento parece ser el camino más prometedor para la obtención de variedades de plantas cultivadas capaces de desarrollarse y permitir agricultura sostenible bajo condiciones ambientales adversas (Ramírez y Guevara, 2000).



**Ilustración 3.8.** Fitomejoramiento en laboratorios.

La biotecnología está empezando a ser un tema cotidiano en nuestras vidas y, al contrario de lo que algunas personas piensan, no se trata de una moda pasajera sino de una forma diferente de entender los procesos productivos (Fernández, 2006).

La biotecnología puede definirse como la aplicación de nuestros conocimientos y nuestra comprensión de la biología para la satisfacción de necesidades prácticas. Según esta

definición, la biotecnología es tan antigua como la siembra de cultivos y la elaboración de quesos y vinos. La biotecnología actual se identifica principalmente por sus aplicaciones médicas y agrícolas basadas en nuestro conocimiento acerca del código genético de la vida (cuadro 3.1.). Se han utilizado varios términos para describir esta forma de biotecnología, entre los que destacan: ingeniería genética, transformación genética, tecnología transgénica, tecnología de DNA recombinante y tecnología de modificación genética o tecnología MG (UNAM, 2000).

**Cuadro 3.1.** Aminoácidos pertenecientes al código genético.

	U		C		A		G	
U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys
	UUC	Phe	UCC	Ser	UAC	Tyr	UGC	Cys
	UUA	Leu	UCA	Ser	UAA	Final	UGA	Final
	UUG	Leu	UCG	Ser	UAG	Final	UGG	Trp
C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg
	CUC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg
	CUA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg
	CUG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg
A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser
	AUC	Ile	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser
	AUA	Ile	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg
	AUG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg
G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly
	GUC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly
	GUA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly
	GUG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly

La tecnología MG nació en la década de 1970. Uno de sus avances más notorios, aparte de las aplicaciones médicas, fue la creación de nuevas variedades de plantas agrícolas transgénicas (ilustración 3.9.). De entonces a la fecha, muchos millones de hectáreas han sido sembradas anualmente con cultivos transgénicos comerciales, como soya, algodón, tabaco, papa (patata) y maíz, en varios países entre los que figuran Estados Unidos (28.7 millones de hectáreas en 1999), Canadá (4 millones de hectáreas), China (0.3 millones de hectáreas) y Argentina (6.7 millones de hectáreas) (James, 1999). Sin embargo, se ha debatido intensamente en torno a los beneficios y riesgos potenciales que podrían derivarse del uso de tales cultivos. (UNAM, 2000).



**Ilustración 3.9.** Nuevas variedades transgénicas.

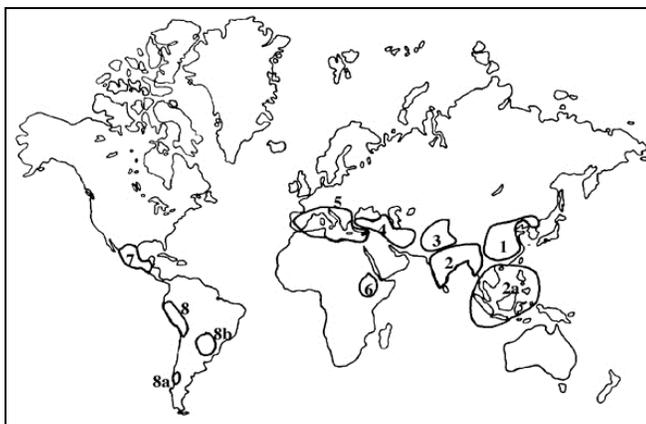
### 3.2.1. *Germoplasma*

El germoplasma es la parte física de las plantas a través de la cual se perpetúa la especie. En plantas de reproducción sexual, el germoplasma está contenido en las semillas. En cambio, en plantas clonales, el germoplasma está contenido en partes vegetativas, tales como bulbos, rizomas, tubérculos, estacas, hojas, incluyendo las semillas de plantas clonales que tienen la facultad de reproducirse asexualmente (López, 2004).

### 3.2.2. *Variabilidad genética*

La variabilidad genética entre los genotipos de una especie es indispensable para tener éxito en todo programa de mejoramiento. Insuficiente variabilidad produce vulnerabilidad genética y limita el avance en el mejoramiento. La principal fuente de variación genética en la naturaleza se encuentra en los centros de origen y diversidad de las plantas. El centro de origen de un cultivo es el área geográfica en el cual dicho cultivo fue domesticado. Un centro de diversidad es una localidad donde existe una gran variabilidad genética entre genotipos de las especies cultivadas y especies relacionadas (López, 2004).

La importancia de los centros de origen y de diversidad (Ilustración 3.10.), radica en facilitar la búsqueda de biodiversidad ya que son fuente de germoplasma y por lo tanto de genes para la conservación y mejoramiento de los cultivos, ya que muchos de estos genes pueden ser transmitidos a las especies cultivadas para elevar su rendimiento, resistencia a plagas y enfermedades, y a factores ambientales como sequía, calor, frío, etc., (López, 2004).



**Ilustración 3.10.** Centros de origen de las plantas según Vavilov.

El trabajo y los estudios de N. I. Vavilov (selección de germoplasma a gran escala en el ámbito mundial) marcaron el comienzo de la investigación sistemática de las tecnologías de colección, mantenimiento y uso de germoplasma de plantas. En función de las colectas hechas por los científicos rusos, Vavilov (1951) propuso ocho centros (cuadro 2) y dos subcentros de origen de las plantas (López, 2004).

**Cuadro 3.2.** Centros de origen de las plantas.

No.	Centros de origen	Ejemplos de plantas cultivadas
1	China	Lechuga, Soya
2	India	Pepino, Mango, Algodón oriental, Arroz
2(a)	Indo-Malaga	Plátano, Coco
3	Asia Central	Almendro, Lino
4	Cercano Oriente	Alfalfa, Manzano, Centeno, Col
5	Mediterráneo	Trigo, Chícharo
6	Etiopía	Café, Sorgo, Mijo-perla
7	Sudamérica y América Central	Fríjol, Maíz, Papaya, Calabaza
8	Sudamérica (Perú, Bolivia, Ecuador)	Papa, Jitomate, Algodón
8(a)	Chile	Papa
8(b)	Brasil-Paraguay	Manioca, cacahuete, piña

### 3.3 MÉTODOS DE SELECCIÓN ARTIFICIAL EN PLANTAS

#### 3.3.1. Selección masal

Narváez, (2001) menciona que la selección masal es el método de selección de plantas en la población según el fenotipo en la siembra conjunta de las semillas de las plantas seleccionadas, así mismo la reproducción de las plantas de la subsiguiente generación a fin de obtener nuevas variedades o mantener la pureza de las variedades ya existentes. De hecho, se trata del método más antiguo de la selección de plantas.

La selección masal (figura 11) se utiliza en el trabajo con las plantas de auto polinización y de polinización cruzada; según las diferencias en las formas de reproducción de esos cultivos la selección masal posee distinta eficacia.



**Ilustración 3.11.** Selección Masal.

La eficacia de la selección masal depende de:

- El efecto del gen que controla la característica por la que se realiza la selección.
- Heredabilidad de la característica.
- Interacción genotipo-ambiente.
- La magnitud de la muestra seleccionada.

La selección masal se basa en la selección de fenotipos, por eso su efectividad en gran medida depende de la herencia de las características deseadas. Cuando la heredabilidad es alta, existe mayor oportunidad de éxito, y en las siguientes generaciones la descendencia corresponderá a la seleccionada inicialmente. Si la heredabilidad es baja, es posible que la descendencia sea sustancialmente distinta de la seleccionada. En este caso es útil aplicar la selección masal múltiple (Narváez, 2001).

### 3.3.2. Selección individual en poblaciones locales de plantas autopolinizadas

Las poblaciones locales de las plantas de autopolinización todavía se encuentran en algunas especies de cereales, leguminosas y pastos. Esas poblaciones pueden ser más o menos heterogéneas producto de la mezcla de diferentes genotipos, hibridación espontánea y mutaciones naturales. No obstante, en virtud del proceso de autopolinización, cada genotipo es en mayor grado homocigoto, por consiguiente, la población en realidad consiste de distintas líneas homocigotas (Narváez, 2001).

Si en semejantes poblaciones aparecen las plantas que se destacan por su tolerancia a las enfermedades, precocidad, resistencia a las temperaturas bajas y sequías, etc., amerita iniciar la selección.

La selección individual se realiza en siguientes pasos (Narváez, 2001):

- 1) La selección individual de las plantas de la población.
- 2) La siembra de las semillas de cada una de las plantas seleccionadas en surcos separados o en parcelas especiales.
- 3) La selección de la mejor descendencia, o líneas, en base de las observaciones de las plantas en el período de vegetación y evaluación de aquellas características por las cuales se realiza la selección.
- 4) Evaluación de las líneas seleccionadas según el rendimiento y otras características y reproducción de las mejores líneas para la obtención de mayor cantidad de semillas a fin de su inscripción en calidad de nuevas variedades mejoradas.

La selección individual se utiliza como el método permanente para la preservación de las variedades de los cultivos de autopolinización. En la siembra normal de cierta variedad se selecciona varios centenares o miles de las mejores plantas y cada una de éstas se desgrana por separado. Antes de sembrar, se realiza el segundo análisis de semillas, después las semillas de cada planta seleccionada siembran en surcos separados o en parcelas distintas. En el período de vegetación se realiza observación individual de cada descendencia, seleccionando para cosecha únicamente las mejores. Ya que no se trata de nuevas variedades, sino del mantenimiento de la pureza varietal y potencial genético de la productividad de la variedad ya existente, las descendencias seleccionadas se pueden unir y reproducir en los años posteriores como semilla élite (Narváez, 2001).

La diferencia entre la selección masal e individual radica en que la selección masal en el segundo año de selección, no permite distinguir entre las descendencias de las plantas individuales; las plantas atípicas (pero no descendencias atípicas) se puede identificar únicamente de manera visual. Por eso el método de la selección individual es eficaz tanto para la obtención de nuevas variedades de las poblaciones locales o naturales, como para el mantenimiento de la pureza de la identidad varietal de las variedades ya creadas (Narváez, 2001).

### 3.3.3. Selección de plantas de autopolinización formada en la Hibridación

La población formada por la hibridación planificada de diferentes variedades, genéticamente es la más valiosa para la selección y obtención de nuevas variedades. Se diferencia de las poblaciones locales o naturales en lo siguiente: la selección en la población híbrida no inicia a partir de las plantas homocigotos presentes en la población, sino desde la identificación de las plantas homo y heterocigotos que aparecen en la segunda generación ( $F_2$ ) producto de de la fecundación de los gametos de las plantas de la primera generación ( $F_1$ ). En este caso también se utilizan los métodos masal e individual de la selección o sus combinaciones. Sin embargo, en cada nueva generación, la segregación ocurre de manera distinta de la que sucede en la generación anterior y posterior, por eso es preciso analizar cada generación, tomando en consideración la estructura genética de la especie, el número de plantas cultivadas y la cantidad de genotipos seleccionados, o intensidad de la selección (Narváez, 2001).

### 3.3.4. Método pedigree

Es el método de la selección individual de plantas en las generaciones segregada y observación de genealogía (pedigree) de las plantas seleccionadas hasta la obtención de las líneas homocigotos. Ese método se utiliza con mayor frecuencia en las plantas de autopolinización, que la selección masal (Narváez, 2001).

### 3.3.5. Cruza de dos progenitores

La población más simple y más ampliamente usada es la craza obtenida del cruzamiento de dos progenitores ( $P1 \times P2$ ). Esta población se conoce como craza de dos poblaciones o craza simple (cuadro 3.3.). Son muy usadas en el mejoramiento de plantas autogamas (trigo, triticale, fríjol) y en plantas alogamas (maíz). En ambos casos el objetivo es la obtención de líneas puras (López, 2004).

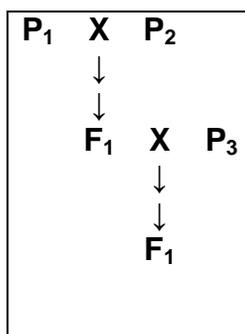
**Cuadro 3.3.** Cruza de dos progenitores

		♂	
		B	B
♀	B	BB	BB
	b	Bb	bb

### 3.3.6. Cruza de tres progenitores

Esta población es formada por el cruzamiento de una craza simple con un tercer progenitor (P1 X P2) X P3 (cuadro 3.4.). Esta población se conoce como craza de tres poblaciones. En este caso, las plantas provenientes del cruzamiento de dos progenitores se cruzan con un tercero. Estas poblaciones se prefieren cuando un progenitor tiene un carácter deseado (P1) pero no es adecuado para otros caracteres para ser usado en una craza de dos progenitores. Los progenitores P2 y P3 son progenitores elite, excepto para el carácter que se desea incorporar del P1 (López, 2004).

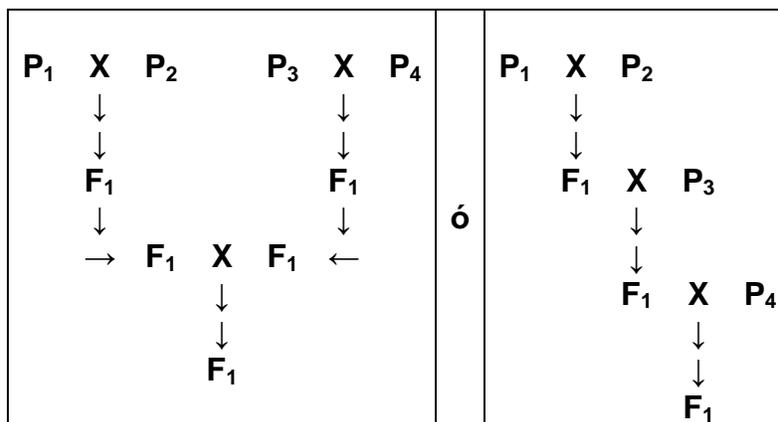
**Cuadro 3.4.** Cruza de tres progenitores.



### 3.3.7. Cruza de cuatro progenitores

Esta población se puede formar de dos formas. Un primer método consiste en el cruzamiento de dos cruza simples (P1 X P2) X (P3 X P4). Esta población es también conocida como craza doble (cuadro 3.5.). En el apareamiento de cuatro poblaciones, cada progenitor contribuye aproximadamente con el 25 % de los alelos en la población final. Un segundo método para la obtención de estas poblaciones podría ser por el cruzamiento de una craza de tres progenitores con otro progenitor. En este caso la contribución genética de cada progenitor no es la misma. Los progenitores P1 y P2 contribuyen con 12.5 % cada uno P3 contribuye con 25 % y P4 contribuye con 50 % (López, 2004).

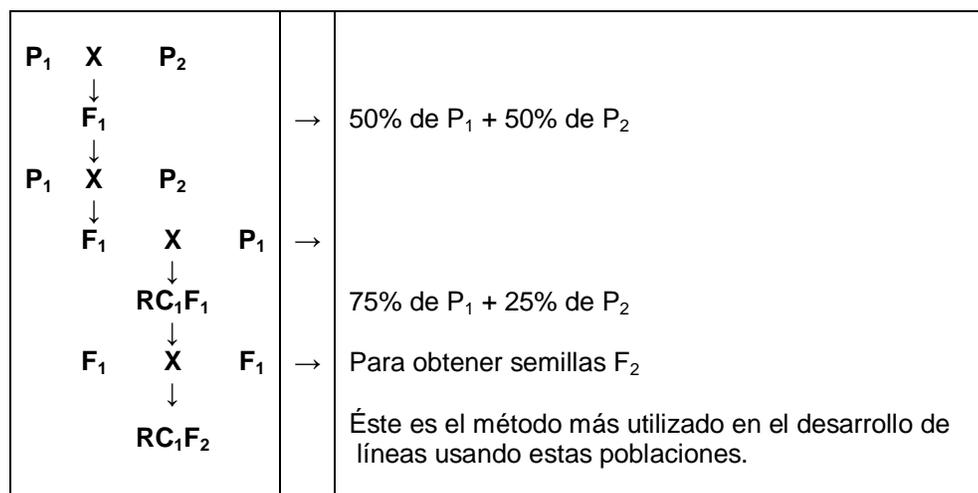
**Cuadro 3.5.** Cruza de cuatro progenitores.



### 3.3.8. Retrocruza

Esta población es formada por el apareamiento de dos progenitores, seguido por el cruzamiento de plantas F1 con alguno de los progenitores (P1 X P2) X P2 (cuadro 3.6.). La retrocruza es una alternativa a las poblaciones de tres progenitores cuando uno de los progenitores tiene un carácter deseable pero es inaceptable para los otros caracteres (López, 2004).

**Cuadro 3.6.** Proceso de una retrocruza.



### 3.3.9. *Interacción genotipo ambiente*

La definición de las estrategias de selección de los programas de mejoramiento genético de cultivos, tanto en generaciones segregantes como en la evaluación de variedades mejoradas, depende en gran medida de la caracterización ambiental (Rodríguez *et al.* 2005).

## 3.4. **PRINCIPALES TIPOS DE CULTIVARES**

### 3.4.1. *Variedades clonales*

Consisten de uno o varios clones muy similares entre sí que son propagados asexualmente, ya sea por tubérculos, rizomas, injertos, bulbos, semillas apomicticas, etc. (López, 2004).

### 3.4.2. *Líneas*

Las líneas consisten de un grupo de plantas genotípicamente iguales y homocigóticas, ya sea en especies alógamas o en autógamas. Estos cultivares son mantenidos por autofecundación o por cruzamientos entre hermanos. En varias especies autógamas, como el frijol, chícharo, trigo, etc., las variedades comerciales son líneas puras, mientras que en algunas autógamas como sorgo, algodón y arroz, y en alógamas, las líneas son usadas como progenitores de híbridos y de variedades sintéticas (López, 2004).

### 3.4.3. *Variedades sintéticas*

Consiste en la progenie obtenida en la primera generación derivada por el intercrucamiento de un grupo específico de más de cuatro líneas o de clones. Estos cultivares pueden ser usados en plantas alógamas y en plantas autógamas en las cuales han sido introducido mecanismos de polinización cruzada ya sea por esterilidad masculina o por autoincompatibilidad (López, 2004).

### 3.4.4. *Compuestos*

Son generados por el cruzamiento de más de dos líneas en plantas autógamas. Estos cultivares son propagados en masa en determinados ambientes, por lo que la selección natural es la principal fuerza que produce cambios genéticos (López, 2004).

### 3.4.5. *Multilíneas*

Es una mezcla de semillas de varias líneas, cada una de las cuales está presente en más de un 5 % del total. La mezcla se hace entre dos o más líneas isogénicas que son

similares en la mayoría de sus características pero difieren un limitado número de caracteres distintivos, tales como la resistencia a enfermedades (López, 2004).

#### 3.4.6. Híbrido

López (2004), indica que el híbrido es la cruce o la primera generación (F1) desarrollada del cruzamiento entre progenitores de constitución genética diferente (Ilustración 3.12.), la cual puede ser producida a través del control de la polinización entre:

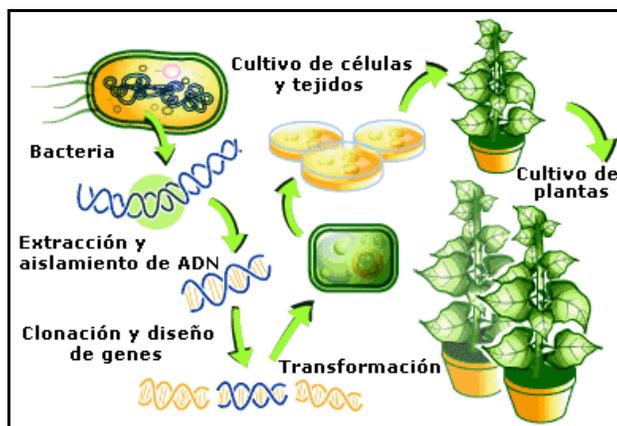
- Dos líneas puras (A X B).
- Una cruce simple y una línea pura (híbrido trilineal).
- Dos cruces simples ((A X B) X (C X D)).
- Una línea pura o una cruce simple y una variedad de polinización libre o un sintético.
- Dos variedades de polinización libre, clones, cultivares o especies.



**Ilustración 3.12.** Producción de híbridos.

#### 3.4.7. Transgénico

Son organismos esencialmente productos ya existentes a los que se les ha alterado su información genética original (Ilustración 3.13.), mediante sofisticados métodos biotecnológicos, con la finalidad de hacerlos más nutritivos, apetitosos o resistentes a plagas e inclemencias del medio (Ortega, 2005).



**Ilustración 3.13.** Producción de transgénicos.

### 3.5. EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE TRANSGÉNICOS

Durante milenios, el fitomejoramiento fue obra de los propios agricultores. En el siglo pasado, particularmente en la segunda mitad, éste fue considerado como un mandato para los científicos. En esta tarea, buena parte de los fitomejoradores confiscaron para ellos mismos esta responsabilidad y poco tomaron en cuenta a los usuarios de sus resultados (Hocdé, 2006).

A metodología del ADN recombinante, combinada con los avances en el cultivo de tejidos, ha abierto una nueva vía para identificar, aislar, modificar, transferir y expresar genes de un organismo en otro. La primera planta transgénica se obtuvo a partir de la introducción de genes bacterianos a principios de los 80. Una década más tarde ya se habían obtenido plantas transgénicas para características de interés en algunos cultivos importantes (Nuez y Pico, 1998).

El proceso consiste en lo siguiente: Se toma cualquier trozo de una planta o tejido animal de interés alimenticio. Si tomáramos una planta, se aísla un gen. El científico separa las células a través de procesos físicos y químicos hasta llegar a una masa que es fácilmente manipulable (Celis, 2000).

Entonces se incorpora el gen seleccionado (o los genes aislados) en células germinales. Luego, se colocan nuevos genes, de otra especie, dentro de esa masa (o cromosoma) a través de un portador (virus, bacteria o antibiótico) que introduce ese gen dentro de la masa o cromosoma de la célula elegida. La nueva célula se reproduce en laboratorio. Después que la planta ha germinado, se procede a cultivarla en campos experimentales. Si la planta, prospera y se desarrolla, se ha obtenido una planta transgénica (Celis, 2000).

#### 3.5.1. Transformación por protoplastos

Consiste en la eliminación de la pared celular de los vegetales, rica en celulosa, mediante el uso de enzimas (o, de forma más complicada, por procedimientos mecánicos). Se originan así los llamados protoplastos, células desnudas que presentan menores impedimentos a la introducción del ADN exógeno y que, al ser individuales, constituyen una aproximación más confiable al momento de pretender conseguir organismos no quiméricos (es decir, organismos que presenten a la vez células transformadas y no transformadas). Los protoplastos pueden incluso fusionarse y regenerar híbridos entre especies sexuales no compatibles (Fernández, 2006).

Los protoplastos pueden obtenerse a partir de líneas celulares de callos iniciados desde embriones inmaduros, inflorescencias inmaduras, mesocótilos, las bases de hojas inmaduras o anteras. Dichos protoplastos pueden ser transformados directamente con ADN exógeno (reacción normalmente facilitada por la adición de polietilenglicol en el tampón), o bien mediante incubación con cepas específicas de la bacteria *Agrobacterium*, mediante electroporación o con tratamiento con liposomas (Fernández, 2006).

### 3.5.2. Transformación por electroporación

Consiste en la aplicación de pulsos eléctricos de elevado voltaje en tiempos muy pequeños. De este modo se crean poros temporales en las barreras externas de las células receptoras y se permite la entrada del ADN extraño. Sin embargo, debido a su baja reproducibilidad, no es una técnica muy empleada (Fernández, 2006).

### 3.5.3. Transformación por bombardeo

Se basa en el bombardeo de la célula vegetal con partículas de tungsteno u oro recubiertas de ADN (lo que se conoce como biolística, una combinación lingüística de biología y balística). La aceleración de las partículas puede producirse por medio de pólvora, gases como el CO<sub>2</sub> o el helio, por medio de una descarga eléctrica y un cañón de ADN (Ilustración 3.14.). Este es un método que se puede considerar universal, debido a que puede utilizarse con éxito en prácticamente todos los organismos vivos. En plantas se han conseguido grandes mejoras en la producción de transformantes al aplicar algunas variaciones al protocolo general: por ejemplo, pre-cultivo de los explantes a transformar, uso de pantallas deflectoras, utilización de micro-proyectiles o someter el tejido a transformar a un pretratamiento osmótico, ya sea por secado parcial en una campana de flujo laminar o mediante cultivo en un medio que contenga un agente osmótico (Fernández, 2006).



**Ilustración 3.14.** Cañón de ADN.

Los vegetales obtenidos por esta técnica presentan a menudo patrones complejos de integración de los transgenes, y es difícil que se den eventos individuales de integración. Además, la técnica parece ser especialmente complicada cuando se pretende integrar genes de un gran tamaño, debido a mecanismos de rotura del ADN. Algunos de estos problemas pueden ser evitados con una modificación de la técnica, llamada “agrolística” (Hansen *et al.*, 1997), que permite la generación de eventos de integración sencillos, incluso después de que se apliquen las técnicas de biolística o de transformación de protoplastos. La potencia de la biolística es tal que permite la integración del ADN exógeno no solamente en el núcleo de la célula, sino que también puede incorporarlo en organelos subcelulares como el cloroplasto (Fernández, 2006).

#### 3.5.4. Transformación mediada por *Agrobacterium*

A pesar de la universalidad de la técnica recién descrita, la opción más utilizada hasta el momento para la introducción en las plantas del material genético adicional es la mediada por la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. Esta bacteria infecta determinados tipos de plantas, especialmente dicotiledóneas, a través de lesiones físicas (cortes y roturas, por ejemplo) en las mismas. Como resultado, se forman tumores denominados agallas en la corona. Parte del ADN de esta bacteria (el llamado T-DNA), contenido en moléculas extracromosómicas llamadas plásmidos, se integra en los cromosomas vegetales y dirige el metabolismo de la planta en beneficio de la bacteria. El mecanismo de integración de este ADN está dirigido por un conjunto de genes bacterianos (los llamados genes *vir*, por virulencia), cuya expresión se induce en presencia de compuestos fenólicos liberados por las propias plantas en crecimiento, como la acetosiringona (Hansen y Chilton, 1999).



**Ilustración 3.15.** Modificación por *Agrobacterium tumefaciens*.

En el laboratorio se puede sustituir parte del ADN bacteriano transferido (T-DNA) por un gen o una secuencia de ADN de interés, al conservarse sólo los elementos que van a permitir la infección y eliminar cualquier otra secuencia adicional o innecesaria. En la mayoría de los casos, las plantas transgénicas obtenidas de este modo presentan eventos de integración sencilla en el cromosoma. Este método de transformación es, con toda seguridad, el más económico y no requiere de equipos sofisticados ni de protocolos complejos, y es tan utilizado en la actualidad que los otros métodos se encuentran prácticamente restringida a aquellos vegetales en los que la infección con *Agrobacterium* no es eficiente. La desventaja inicial de que *Agrobacterium* infecta de preferencia dicotiledóneas pero no es muy eficaz en monocotiledóneas, ha sido superada con la adaptación y creación de protocolos específicos para estas últimas (Smith y Hood, 1995).

Así, pueden destacarse los éxitos obtenidos en la transformación de embriones inmaduros y callos embriogénicos de trigo (*Triticum sp.*), embriones inmaduros de cebada (*Hordeum sp.*), maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Lo mismo ocurre con otros vegetales tradicionalmente resistentes al sistema de transformación mediado por *Agrobacterium*. Así, la formación de barreras necróticas con las que algunas plantas como la vid (*Vitis vinífera* L.) se defienden de la penetración de la bacteria ha sido superada mediante la adición a la mezcla de antioxidantes como la polivinilpirrolidona o el ditiotreitól. Del mismo modo, la forma en la que el álamo (*Populus alba* L.) y el chopo (*Populus trichocarpa*) combaten la infección, mediante necrosis del ápice de los tallos, puede evitarse tamponando el medio con ácido 2-(N-morfolino) etanosulfónico y con gluconato de calcio (Fernández, 2006).

### 3.5.5. Métodos alternativos de transformación

Existen otros métodos alternativos de transformación de plantas no muy usados por encontrarse en etapas iniciales de desarrollo o por ser poco fiables. Entre ellos, podríamos destacar la introducción de ADN por medio de fibras de carburo de celulosa, aunque tales fibras tienen un alto potencial carcinogénico; la microinyección de ADN en zigotos (Ilustración 3.16.), una técnica mucho más utilizada en animales; o la toma de ADN desnudo mediada por microhaces de láser (Fernández, 2006).



**Ilustración 3.16.** Inyección de ADN.

## 3.6. MUTACIONES

Una mutación suele descubrirse cuando aparece un carácter heredable que no se encontraba en los antepasados inmediatos. Las modificaciones producidas son el resultado de alteraciones en el material hereditable de la célula (Wilson y Loomis, 1980).

La probabilidad de que un determinado gen bacteriano sufra una alteración espontánea heredable (mutación) varía aproximadamente entre  $10^2$  y  $10^9$  generaciones de células bacterianas, dependiendo del gen de la célula huésped y del mecanismo mutacional (Freeman, 1985).

Normalmente en una población, una de cada  $10^6$  a  $10^9$  células hijas nuevas resultará alterada en un determinado gen, si bien algunos mecanismos mutacionales descritos recientemente conducen bajo ciertas circunstancias, a mayores frecuencias. Si se tiene en cuenta que las bacterias se estudian en general como poblaciones y raramente como células individuales, es evidente que no se detectará una célula mutante única a menos que su progenie se convierta en parte sustancial de la población. Esta situación se da cuando se coloca a las bacterias en un entorno favorable para un mutante que resulta estar presente en ellas, pero adverso para el crecimiento de la población no mutante. Debido a su resistencia frente a los efectos del medio adverso, el mutante tendrá una ventaja selectiva sobre la mayoría de la población y crecerá rápidamente (Freeman, 1985).

### 3.6.1. Efectos de la mutación génica sobre el fenotipo

Ciertas funciones celulares, como la replicación del DNA, la síntesis de RNA y proteínas y la división celular, son indispensables para la célula. Las mutaciones que inactivan algunos de los genes que determinan dichas funciones son letales, sin importar el medio ambiente celular. Por tanto, las mutaciones fatales son en esencia indetectables y no sirven para determinar la naturaleza de la función celular afectada (Freeman, 1985).

En consecuencia, las mutaciones que afectan a estas propiedades y funciones pueden ser analizadas genéticamente para asegurar los rasgos alterados. Se alude a la dotación genética total de una célula como su genotipo; en contra posición, las características celulares observables de ésta constituyen su fenotipo, por ejemplo: no utilización de la lactosa o utilización de sacarosa. No puede deducirse el genotipo celular sin un detallado análisis genético; por ejemplo, una célula mutada que no consiga metabolizar un compuesto puede ser deficiente en una enzima intracelular responsable de su degradación y/o de otra necesaria para su transporte hacia el interior de la célula. Por consiguiente, el mismo fenotipo puede ser la expresión de un gran número de alteraciones genotípicas distintas (Freeman, 1985).

### 3.6.2. Mutantes letales condicionales

El estudio genético de las funciones celulares indispensables se hizo posible gracias a la utilización de mutantes letales condicionales, o sea, alteraciones genéticas que son letales sólo bajo ciertas condiciones. Por ejemplo algunas mutaciones que afectan necesariamente a funciones celulares dan como producto proteínas sensibles a altas temperaturas (42°C; condición letal), sin embargo, dichas proteínas son funcionales a temperaturas más bajas (30°C). Por el contrario, se ha visto que otras mutaciones que también afectan a funciones indispensables se expresan fenotípicamente sólo a temperaturas baja; tales mutantes crecen normalmente a temperaturas elevadas. Otro tipo de alteraciones genéticas letales condicionales que han resultado extremadamente útiles en el análisis genético son las llamadas mutaciones sin sentido, las cuales consisten en una alteración particular del código genético que provoca la terminación prematura de la síntesis proteica (Freeman, 1985).

### 3.6.3. Mutantes para la fuente de carbono y los factores de crecimiento

La capacidad de una célula para utilizar diferentes carbohidratos es una propiedad dispensable. Por ejemplo la *Escherichia coli* es capaz de usar un gran número de carbohidratos como fuente de carbono, pero hay mutantes que se caracterizan fenotípicamente por que no pueden utilizar alguno de ellos. También es condicionalmente dispensable la capacidad de síntesis de factores de crecimiento específicos como aminoácidos, purinas, pirimidinas o vitaminas. Las propiedades que afectan a estas propiedades nutricionales esenciales se denominan auxotróficas y el organismo mutante recibe el nombre de auxótrofo, para distinguirlo del protótrofo, que es el organismo salvaje

independiente de los factores del crecimiento. Los mutantes auxótrofos se reconocen por su incapacidad para crecer en un medio químico determinado que carezca del factor del crecimiento necesario que ellos no sintetizan. Por tanto, el tipo salvaje de *E. coli*, capaz de sintetizar todos sus factores de crecimiento, crecerá en un medio definido constituida por una fuente inorgánica de nitrógeno sales, agua y una fuente de carbono utilizables como glucosa; los mutantes auxótrofos de *E. coli*, sólo crecerán en este medio si se le adiciona el aminoácido u otras sustancias complementarias retenidas, tales como purinas, pirimidinas, vitaminas, etc (Freeman, 1985).

Los distintos factores de crecimiento se sintetizan a partir de elementos precursores mediante una serie de pasos directos, mediados cada uno de ellos por una enzima específica. De esta forma, las mutaciones auxotróficas pueden además caracterizarse bioquímicamente según la enzima que resulte afectada de una ruta catabólica o anabólica. Los auxotrófos pueden llevar a cabo sus funciones de síntesis o degradación hasta aquel paso de la ruta mediado por la enzima afectada y acumulan, por tanto, el intermediario correspondiente. Si el producto intermediario siguiente se suministra de forma exógena, la ruta de síntesis continúa, reanudándose el crecimiento celular. En consecuencia los mutantes auxótrofos que se encuentren “genéticamente bloqueados” en diferentes pasos de una ruta biosintética pueden servir para obtener información en relación al número, orden y naturaleza de los productos intermediarios y las enzimas implicadas (Freeman, 1985).

#### 3.6.4. Mutantes resistentes a fagos y a agentes químicos

Dentro de las funciones celulares dispensables se encuentran la resistencia a los bacteriófagos y a los inhibidores químicos tales como la estreptomina, el clorafenicol, la azida o el ácido nalidíxico. Generalmente estos agentes son transportados de forma específica al interior de la célula bacteriana y afectan a ciertos mecanismos esenciales de la maquinaria celular. Las mutaciones para la resistencia a los fagos pueden ser debidas a alteraciones de los receptores de éstos, situados en la superficie celular bacteriana, de manera que el virus ya no es capaz de absorberse a la célula e inyectarla a su ADN. Sin embargo, también puede reflejar un cambio en algún mecanismo interno del huésped que sea esencial para la replicación de un genoma viral inyectado. La resistencia a los agentes antimicrobianos puede aparecer como consecuencia de una pérdida de la permeabilidad de la membrana frente a ellos, o puede deberse a un cambio en la capacidad de la célula para procesar dichos agentes en su interior. Las mutaciones dependientes de estreptomina darán lugar a ribosomas alterados que recuperan su conformación activa en presencia de antibióticos (Freeman, 1985).

#### 3.6.5. Alteraciones antígenas

El carácter antigénico de la bacteria deriva de aquellas estructuras celulares externas a la membrana tales como la capa externa de lipo-polisacáridos de membrana, la cápsula, los pili (fimbrias) y los flagelos. Las mutaciones de los genes que controlan la biosíntesis de

estas estructuras serán como resultado su pérdida o su alteración y, en consecuencia, un cambio de la dotación antigénica. La capacidad antigénica celular se debe en su mayor parte a la capa externa de lipo-polisacáridos que es donde se encuentran los antígenos somáticos. Su naturaleza química se ha estudiado más intensamente en bacterias gram-negativas, sobre todo en el género *Salmonella*, cuyos miembros representan una amplia variedad de especificidades serológicas y su especificidad antigénica reside en la porción lipopolisacáridica de la membrana externa.

Las mutaciones que controlan los distintos pasos de la biosíntesis, tanto de la estructura central como de las cadenas laterales, puede reflejarse fenotípicamente en la pérdida de la especificidad del antígeno O. Dichos mutantes se denominan rugosos (debido a su inusual capacidad de auto-aglutación en medio salino y a la morfología alterada de sus colonias) para distinguirlos del tipo salvaje que sintetiza antígeno y que recibe el nombre de liso, por el aspecto homogéneo de sus colonias (Freeman, 1985).

Los flagelos, pilis y cápsulas son, por supuesto, superficies celulares accesorias, y su pérdida como consecuencia de una mutación implica también la pérdida de la antigenicidad que reside en tales estructuras. La pérdida de los flagelos provocada por una mutación en los genes determinantes de las subunidades polipeptídicas que constituyen estos apéndices produce también un cambio secundario en el genotipo celular, que es la pérdida de la motilidad. Sin embargo, también pueden producirse mutaciones en los genes que controlan la motilidad, provocando parálisis flagelar sin que haya pérdida concurrente de los flagelos (Freeman, 1985).

### **3.7. EL OBJETIVO DEL MEJORAMIENTO VEGETAL**

Los cultivos actuales son el resultado del mejoramiento genético convencional que el hombre ha venido realizando durante siglos a través de ciclos de selección y cruzamientos. En sus comienzos, el mejoramiento genético fue un arte, pero a fines del siglo XIX se transformó en una tecnología de base científica con el descubrimiento de los principios de la genética y de la citogenética (Camadro, 2003).

El objetivo general de la genotecnia vegetal es el desarrollo de tecnologías que permitan mejorar aquellas características de unas especies que contribuya a elevar su valor económico. Las partes de una planta con valor económico pueden ser: las hojas, los tallos, las raíces, las flores, los frutos, y las semillas (Camadro, 2003).

#### **3.7.1. Resistencia a plagas**

La obtención de variedades resistentes a plagas, nematodos y enfermedades, comúnmente evita o minimiza la necesidad del uso de fungicidas, nematicidas y plaguicidas aunque las plantas sean expuestas a dichos agentes patológicos (Camadro, 2003).

Obviamente, los agricultores se beneficiarían si se desarrollan plantas transgénicas resistentes a plagas específicas. Por ejemplo, en Hawái se han estado vendiendo y plantando, desde 1996, papayos resistentes a la mancha anular viral de la papaya. Por otra parte, el ambiente también se beneficiaría al aminorar el uso de plaguicidas. Los cultivos transgénicos que contienen genes de resistencia a los insectos, procedentes de *Bacillus thuringiensis*, han hecho posible reducir considerablemente la cantidad de insecticida que se le aplica al algodón en Estados Unidos. En un análisis, por ejemplo, se demostró que hubo una reducción de dos millones de hectáreas tratadas en 1999, es decir, un millón de kilogramos de insecticidas químicos, en comparación con 1998. Sin embargo, las poblaciones de plagas y organismos fitopatógenos se adaptan rápidamente y se vuelven resistentes a los plaguicidas, y no existen razones para suponer que no ocurrirá lo mismo, y con la misma rapidez, en el caso de las plantas transgénicas. Además, los biotipos de las plagas varían de una región a otra (Rivas, 2008).

Por ejemplo, es probable que los cultivos resistentes a insectos diseñados para Estados Unidos y Canadá tengan resistencia a plagas que no ocasionan problemas en los países en vías de desarrollo, y esto ocurre por igual en las plantas transgénicas y en las desarrolladas por medio de técnicas de cruzamiento ordinarias. Incluso en el caso de que los mismos genes de resistencia a los insectos o los herbicidas sean útiles en varias regiones, normalmente es necesario introducirlos en cultivares adaptados a las condiciones locales. Por lo tanto, se requieren más investigaciones sobre las plantas transgénicas que se han vuelto resistentes a plagas locales, a fin de evaluar su sustentabilidad frente a un aumento en las presiones de selección para plagas cada vez más virulentas (Rivas, 2008).

### 3.7.2. Control de enfermedades virales

Las enfermedades virales son causa de pérdidas masivas del cultivo cada año. Los grupos de virus que infectan las principales plantas son variados, los más conocidos son los virus mosaico. Los virus producen enfermedades mortales en las plantas y son capaces de acabar con cultivos enteros puesto que el contagio mediante insectos (u otros vectores) propaga rápidamente la enfermedad y produce un deterioro permanente de los cultivos. Se han diseñado plantas transgénicas resistentes a diferentes enfermedades virales mediante ingeniería genética. El principio de la resistencia a enfermedades virales es la expresión de proteínas del mismo virus, que compitan con las partículas virales infecciosas e interrumpan los procesos de entrada a las células y de replicación. También se han diseñado plantas transgénicas que expresan proteínas capaces de interferir con los circuitos de regulación génica de los virus, inhibiendo la replicación del genoma viral y la síntesis de proteínas virales imprescindibles, mediante RNA antisentido. En este campo también se han hecho avances acerca de la resistencia a enfermedades bacterianas y virales, mediante plantas productoras de ciertas proteínas y sustancias que funcionan como antibióticos y antimicóticos (Sánchez, 2008).

### 3.7.3. Mejora del rendimiento

Una de las principales tecnologías que desembocaron en la "Revolución verde", fue la creación de variedades de trigo semi-enanas de alto rendimiento. Los genes responsables de esa reducción de altura fueron los genes japoneses NORIN-10 introducidos en los trigos occidentales durante la década de 1950 (genes del enanismo insensibles a la giberelina). Estos genes tenían dos ventajas: producían una planta más corta y fuerte, que respondía bien a la aplicación de más fertilizante sin colapsarse; y aumentaban directamente el rendimiento al reducir la elongación celular de las partes vegetativas de la planta, de modo que ésta invertía más energía en las partes reproductivas comestibles. Estos genes fueron aislados en fechas recientes, y se demostró que actúan exactamente de la misma manera cuando se les utiliza para transformar otras especies de plantas agrícolas. Hoy por hoy, esta técnica de enanismo puede utilizarse para aumentar la productividad de cualquier planta agrícola cuyo rendimiento económico se encuentre en las partes reproductivas, en vez de en las vegetativas (Rivas, 2008).

La cantidad de producción por unidad de superficie es un carácter de importancia primaria. En maíz, los trabajos realizados por el Doctor G. H. Shull en 1909, dieron como resultado la obtención de maíz híbrido, siendo ésta la primera gran aportación de la genotecnia moderna en el siglo XX. El desarrollo de híbridos de cruce doble desarrollados por el Dr. Jhones en 1918, que permitió la obtención de cantidades adecuadas de semilla a costos razonables, reemplazó a las variedades de polinización libre durante la década de los 30's. Lográndose un incremento en el rendimiento del 7 al 12 %. En general, el desarrollo y uso de los híbridos resultó en un incremento del rendimiento del grano superior al 50 % sobre las variedades de polinización libre (Camadro, 2003).

### 3.7.4. Fijación de nitrógeno

Se han creado plantas transgénicas con amplio espectro de asimilación de *Rhizobium* sp., una bacteria fijadora de nitrógeno. Estas bacterias normalmente hacen simbiosis solamente con las leguminosas, pero las nuevas tendencias en biotecnología vegetal han logrado ampliar el espectro de huésped a otras plantas (Sánchez, 2008).

### 3.7.5. Tolerancia al estrés biótico y abiótico

Causado por algunos minerales: Salinidad, alcalinidad, o deficiencia de hierro, zinc, fósforo u otros nutrientes. Las variedades tolerantes rinden hasta 2 ton ha<sup>-1</sup> más que los no tolerantes. Se han desarrollado variedades de soya que se desarrollan bien en suelos calcáreos. Se han desarrollado variedades de trigo y de maíz tolerantes a la toxicidad causada por el aluminio (Camadro, 2003).

La creación de cultivos con resistencia intrínseca al estrés biótico y abiótico, ayudaría a estabilizar la producción anual. Por ejemplo, el virus de la mancha amarilla del arroz (RYMV) devasta los arrozales africanos al destruir directamente la mayor parte del cultivo,

con un efecto secundario en las plantas sobrevivientes, a las que vuelve más vulnerables a las infecciones micóticas. Como resultado, este virus ha puesto en serio peligro la producción arroceras de África. Los métodos ordinarios de control del RYMV, que se basan en las técnicas tradicionales de cruzamiento, no han logrado introducir la resistencia de las especies silvestres en el arroz cultivado. Los investigadores han recurrido a una nueva técnica, que imita la "inmunización genética", al crear plantas de arroz transgénicas que son resistentes al RYMV (Rivas, 2008).

Actualmente, las variedades transgénicas resistentes están a punto de ser sometidas a pruebas de campo con el fin de evaluar la eficacia de su resistencia al RYMV. Esta podría ser la solución del riesgo de colapso total de las regiones arroceras del sub-Sahara africano (Rivas, 2008).

Podríamos dar muchos otros ejemplos para ilustrar la gama de las investigaciones científicas actuales, como las plantas transgénicas modificadas para combatir el virus de la mancha anular de la papaya, las papas resistentes al tizón y arroz resistente al tizón bacteriano de la hoja, o como ejemplo de un factor abiótico, plantas modificadas para producir un exceso de ácido cítrico en las raíces que, de ese modo, toleran mejor el aluminio presente en los suelos ácidos. Estos ejemplos tienen un claro potencial comercial, pero será imprescindible, si es que queremos obtener los máximos beneficios, que la investigación de tecnología MG siga financiada con recursos públicos. Por ejemplo, pese a que la tecnología MG nos da acceso a nuevas pozas genéticas donde se encuentran fuentes de resistencia, será necesario demostrar que dichas fuentes serán más estables que las fuentes de resistencia intraespecíficas usadas de manera ordinaria (Rivas, 2008).

### 3.7.6. *Uso de tierras marginales*

Una inmensa extensión de la superficie terrestre del planeta, tanto en las costas como en el interior de los continentes, se considera marginal porque es excesivamente salina o alcalina. Ya se logró identificar, clonar y transferir a otras plantas un gen de tolerancia a la sal presente en el mangle negro (*Avicennia marina*). Según se ha visto, las plantas transgénicas toleran mayores concentraciones de sal. Asimismo, el gen *gutD*, de *Escherichia coli*, ha servido para generar plantas de maíz transgénicas que toleran la sal. Estos genes representan una fuente potencial para el desarrollo de sistemas agrícolas que permitan el uso de las tierras marginales (Rivas, 2008).

### 3.7.7. *Producción de frutos más resistentes*

El primer transgénico que salió al mercado fue el tomate "Flavr-Savr" de Calgene, el cual posee un gen artificial que genera un RNA de antisentido que inhibe la producción de la proteína responsable de la senescencia del fruto. Esta tecnología permite almacenar y tener más tiempo de exposición al ambiente de muchos frutos sin que se ablanden y se malogren (Sánchez, 2008).

### 3.7.8. Beneficios en cuanto a nutrición

La deficiencia de vitamina A es causa de que medio millón de niños queden parcial o totalmente ciegos cada año. Los métodos tradicionales de mejora de plantas no han logrado producir cultivos que contengan altas concentraciones de vitamina A, de modo que la mayoría de los gobiernos dependen de costosos y complejos programas de complementación para atender este problema. Los investigadores han introducido tres nuevos genes en el arroz: dos de ellos proceden del narciso y uno de cierto microorganismo. El arroz transgénico exhibe mayor producción de beta-caroteno, el precursor de la vitamina A, y la semilla es de color amarillo. Este arroz amarillo o dorado, puede ayudar a resolver el problema de la deficiencia de vitamina A entre los niños de las regiones tropicales (Rivas, 2008).

La fortificación con hierro es necesaria porque los cereales son deficientes en micronutrientes esenciales como este metal. La deficiencia de hierro provoca anemia en las mujeres embarazadas y los niños pequeños. Por consiguiente, cerca de 400 millones de mujeres en edad reproductiva sufren de esta afección y tienen mayores riesgos de muerte fetal o de parir niños con muy bajo peso, así como una mayor probabilidad de muerte por parto. La anemia ha sido identificada como un factor de riesgo en más de 20% de los casos de muerte posparto en Asia y África. Mediante el uso de genes relacionados con la síntesis de una proteína fijadora de hierro y con la producción de una enzima que facilita la absorción del hierro presente en los alimentos humanos, se produjo un arroz transgénico con altas concentraciones de hierro. Estas plantas contienen de dos a cuatro veces más hierro que el arroz no transgénico, pero queda pendiente investigar su asimilación biológica (Rivas, 2008).

### 3.7.9. Menor impacto ambiental

La disponibilidad y el uso eficiente del agua se han convertido en temas de importancia mundial. Los suelos sometidos a labores de labranza intensa (arado) para el control de las malezas y la preparación del suelo, son propensos a la erosión y sufren una grave pérdida de agua. Las comunidades tradicionales han recurrido por muchos años a sistemas de labranza mínima. Existe la necesidad de crear cultivos que prosperen en tales condiciones, incluyendo la introducción de resistencia a enfermedades de las raíces que se controlan actualmente por medio de la labranza, así como de herbicidas que puedan ser utilizados en vez de la labranza. Según se ha visto en los países más desarrollados, la tecnología MG es una herramienta útil para introducir resistencia a las enfermedades radiculares en condiciones de labranza mínima. Sin embargo, será necesario un cuidadoso análisis de tipo costo-beneficio, a fin de asegurar el logro del máximo provecho. Asimismo, será necesario evaluar minuciosamente las diferencias regionales en cuanto a técnicas agrícolas, así como el impacto potencial de la sustitución de un cultivo tradicional por uno nuevo de tipo transgénico (Rivas, 2008).

### 3.7.10. Mejora con fines ornamentales

Algunas plantas de importancia ornamental han sido modificadas para mejorar sus características estéticas, en especial el color de las flores y de esta manera hacerlas más atractivas al consumidor, por medio de la manipulación de pigmentos se han logrado colores de flores inexistentes en la naturaleza (Sánchez, 2008).

### 3.7.11. Producción de plantas bioreactoras

La posibilidad de inserción de genes en plantas, es tan amplia, que permite actualmente, generar nuevas plantas que funcionen como bioreactores para descontaminación y reciclaje de productos (Sánchez, 2008).

### 3.7.12. Otros beneficios de las plantas transgénicas

Las variedades transgénicas de primera generación han beneficiado a muchos agricultores en forma de menores costos de producción, mayores rendimientos o ambas cosas. En muchos casos, también han beneficiado al ambiente porque reducen el uso de plaguicidas o permiten la siembra de cultivos con menos actividades de labranza. Los insectos ocasionan enormes pérdidas agrícolas en el campo y en los productos cosechados que se encuentran en tránsito o almacenamiento, pero las preocupaciones en cuanto a la salud de los consumidores y el impacto ambiental, han limitado el registro de muchos plaguicidas químicos prometedores. Los genes de resistencia a las plagas, cuando son introducidos cuidadosamente en los cultivos para evitar la selección futura de resistencia a las plagas, constituyen alternativas con las que puede reducirse el uso de plaguicidas químicos en muchos cultivos importantes. Además, reducir la contaminación de nuestros alimentos por parte de patógenos que constituyen riesgos de salud por la vía alimenticia (p.ej., las micotoxinas), sería benéfico para los agricultores y consumidores por igual (Rivas, 2008).

### 3.7.13. Fármacos y vacunas procedentes de plantas transgénicas

Existen vacunas contra muchas de las enfermedades que le provocan grandes sufrimientos e incluso la muerte a numerosas personas en los países en vías de desarrollo, pero su producción y aplicación son normalmente muy costosas. Casi todas las vacunas deben ser almacenadas en condiciones de refrigeración, y para su aplicación se depende de especialistas debidamente capacitados, lo que se suma a los gastos. En algunos países, incluso el costo de las agujas para inyectar las vacunas puede ser prohibitivo. Por consiguiente, suele suceder que las vacunas no llegan a quienes más las necesitan. Actualmente, los investigadores están estudiando el potencial de la tecnología MG para la producción de vacunas y fármacos por medio de plantas. Esto significaría un acceso más fácil, una producción más económica y una manera alternativa de generar ingresos. Ya se han producido vacunas contra enfermedades infecciosas del aparato digestivo en plantas como la papa y el plátano (banano). Otro objetivo adecuado serían los

cereales. Recientemente se logró expresar, en semillas de arroz y trigo, un anticuerpo contra el cáncer que reconoce células cancerosas de pulmón, mama y colon y que, por lo tanto, puede ser útil para el diagnóstico y la terapia en lo futuro (Rivas, 2008).

Estas tecnologías se encuentran en una fase aún muy temprana de su desarrollo, y será necesario investigar las preocupaciones obvias en cuanto a la salud humana y la seguridad ambiental durante su producción, antes de que dichas plantas sean aprobadas como cultivos especiales. No obstante, la creación de plantas transgénicas para la producción de sustancias terapéuticas tiene un enorme potencial como una manera de ayudar a resolver los problemas de enfermedad en los países en vías de desarrollo (Rivas, 2008).

Casi una tercera parte de las medicinas que se utilizan actualmente se derivan de las plantas, uno de los ejemplos más famosos es el de la aspirina (la forma acetilada de un producto natural de las plantas, el ácido salicílico) Se cree que menos de 10% de las plantas medicinales han sido identificadas y caracterizadas, y existe la posibilidad de utilizar la tecnología MG de tal manera que aumente los rendimientos de las sustancias medicinales una vez identificadas. Por ejemplo, las valiosas sustancias contra el cáncer vinblastina y vincristina son los únicos medicamentos aprobados para el tratamiento del linfoma de Hodgkin. Ambas se derivan de la vincapervinca (hierba doncella) de Madagascar, que las produce en muy pequeñas concentraciones junto con 80 a 100 compuestos químicos muy similares. Por consiguiente, la producción de estos compuestos terapéuticos es sumamente costosa. En la actualidad se están llevando a cabo investigaciones intensivas con el fin de descubrir el potencial de la tecnología MG en cuanto se refiere a incrementar las concentraciones de compuestos activos o permitir su producción en plantas más fáciles de cultivar que la vincapervinca (Rivas, 2008).

Es nuestra recomendación que la investigación y desarrollo de cultivos transgénicos debiera enfocarse en plantas que: (i) aumenten la estabilidad de la producción; (ii) le aporten beneficios nutritivos al consumidor; (iii) reduzcan el impacto ambiental de la agricultura intensiva y extensiva; y (iv) faciliten la producción de fármacos y vacunas; al mismo tiempo que (v) se desarrollen protocolos y reglamentos que aseguren que los cultivos transgénicos diseñados para satisfacer necesidades no alimenticias, como la producción de compuestos farmacéuticos, sustancias químicas industriales, etc., no se difundan o mezclen con otros cultivos alimenticios transgénicos o no transgénicos (Rivas, 2008).

Camadro (2003), menciona que la Manipulación directa del ADN por técnicas de ingeniería genética sirven para:

- Transferencia de genes (transgénesis) que controlan la resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades, a herbicidas, a heladas, a sequía, el contenido y tipo de determinadas sustancias asociadas con la calidad, como almidón o vitaminas, entre otros caracteres de interés agronómico, culinario e industrial, a cultivares adaptados

que mantienen el fenotipo característico; por ej., en ajo, apio, cebolla, crucíferas, espárrago, papa, perejil, poroto, tomate, zanahoria. La transgénesis puede hacerse entre especies que inclusive pueden pertenecer a distintos reinos de la naturaleza (por ej., resistencia a heladas en papa controlada por un gen de un salmónido);

- Caracterización de germoplasma por patrones electroforéticos (equivalentes a impresiones digitales, para identificar especies y cultivares).
- Estimación de la diversidad genética para planificar estrategias del mejoramiento.
- Construcción de mapas genéticos para marcadores moleculares y de ligamiento con caracteres de interés agronómico, para realizar selección en el laboratorio asistida por dichos marcadores.

### **3.8. CULTIVO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS EN EL MUNDO**

En 2006, el primer año de la segunda década de comercialización de cultivos biotecnológicos 2006-2015, la superficie mundial de cultivos biotecnológicos continúa aumentando para el décimo año consecutivo en una sostenida tasa de crecimiento del 13%, ó 12 millones de hectáreas (30 millones de acres), alcanzando 102 millones de hectáreas (252 millones de acres). Este es un hito histórico, en el que por primera vez que en más de 100 millones de hectáreas, en un año son cultivados productos biotecnológicos (James, 2006).

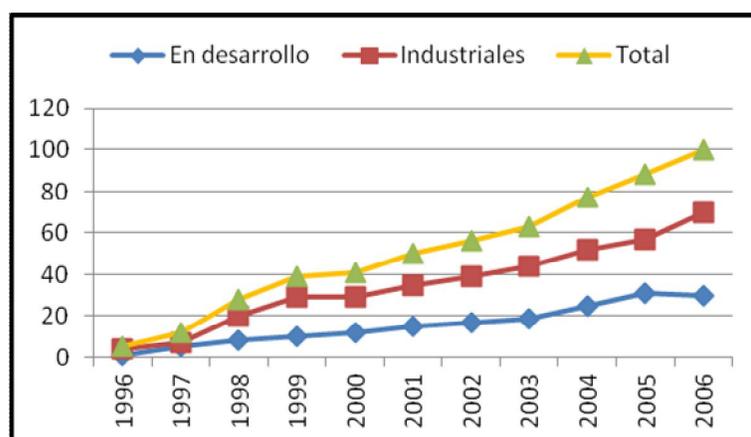
El futuro de los cultivos biotecnológicos se ve alentador con el número de países que adoptan las cuatro corrientes principales. La cantidad de cultivos transgénicos crecerá y tanto la superficie global y el número de agricultores que cultivan productos biotecnológicos aumentará a medida que la primera generación de cultivos biotecnológicos se adopta más ampliamente y la segunda generación de nuevas aplicaciones y la producción esté disponible. Las perspectivas para la próxima década de comercialización de 2006 a 2015, apunta a un crecimiento continuo en la superficie global de cultivos biotecnológicos, hasta 200 millones de hectáreas, con al menos 20 millones de agricultores que plantan cultivos biotecnológicos en hasta 40 países, o más, por 2015 (James, 2006).

Genes que confieren un grado de tolerancia a la sequía, que se espera estén disponibles en torno a 2010-2011, se prevé que tengan un impacto sustancial en relación con los rasgos de la corriente entrante y será particularmente importante para los países en desarrollo que sufren más por la sequía, el obstáculo más frecuente e importante al aumento de de cultivos en todo el mundo de la productividad. En la segunda década de comercialización, 2006-2015, es probable que cuenten con un crecimiento significativamente mayor en Asia en comparación con la primera década, que fue la última

de las Américas, en el que habrá un crecimiento continuo en los rasgos apilados en América del Norte y el fuerte crecimiento en Brasil (James, 2006).

### 3.8.1. Producción

El primer cultivo aceptado a nivel internacional y nacional fue el jitomate FLAVR SAVR, desarrollado por el grupo Calgene, que presenta la característica de maduración lenta (Rodríguez y González, 2007). Desde entonces la adopción de cultivos GM ha incrementado continuamente a nivel mundial con una tasa de crecimiento de 13% (12 millones de hectáreas) alcanzando las 102 millones de hectáreas, tal como se observa en la Ilustración 3.17.



**Ilustración 3.17.** Área de producción de los países en millones de hectáreas.

### 3.8.2. Situación de los cultivos transgénicos

La producción y comercialización de cultivos transgénicos a nivel internacional se ha incrementado de manera constante desde que se introdujeron al comercio en 1994. Es importante destacar los cultivos que predominan el mercado, la modificación genética más empleada, los principales países productores, la situación de México en el contexto de los cultivos transgénicos con respecto a su comercialización y cultivo (Rodríguez y González, 2007).

En la actualidad existen variedades transgénicas en más de 60 especies de plantas, incluyendo algunos de los cultivos de mayor importancia económica. En E.U.A se ha aprobado la comercialización de variedades transgénicas de tomate, algodón, maíz, soya, papa, colza, calabaza y papaya. Otras muchas variedades transgénicas se encuentran en fase de ensayos de campo y se comercializarán en pocos años. En la actualidad sólo en Estados Unidos se han autorizado ya 2,919 ensayos de plantas transgénicas de las cuales

un 4.7 % representan resistencia a hongos, un 9.9 % presenta resistencia a virosis, un 20.2 % a parámetros de calidad, un 23.8 % son resistentes a insectos y un 29.6 son resistentes a herbicidas (Nuez y Pico, 1998).

Desde su primera comercialización a fines de los 90, los cultivos transgénicos han sido adoptados cada vez en mayor medida en todo el mundo a una tasa sin precedentes. Concretamente, según un informe publicado en enero de 2007, por el Servicio Internacional para la Adquisición de las Aplicaciones Agro biotecnológicas (ISAAA), desde su comercialización inicial en 1996, el área global de cultivos transgénicos pasó de 1,7 millones de hectáreas en seis países, a 102 millones de hectáreas en 22 países en 2006. Es decir que a comienzos de 2007, la segunda década de su adopción, el área de cultivos transgénicos se incrementó en un 13% con respecto a 2005, alcanzando las 102 millones de hectáreas, el 29 segundo incremento más alto de los últimos 5 años. Considerando todo el período 1996-2006 el área aumentó 60 veces, un incremento sin precedentes (Sánchez, 2008).

Esta rápida adopción de la biotecnología agropecuaria responde a los beneficios que ofrece, entre ellos la estabilidad y sustentabilidad de la producción agropecuaria, mejorando el rendimiento de los cultivos (más alimentos sin aumentar significativamente el área sembrada), el incremento del valor nutricional de los alimentos, y la expansión de los procesos y productos vinculados al sector agropecuario, a otras áreas industriales (plásticos, textiles, papel, energía, productos químicos, entre otros) (Sánchez, 2008).

Cada una de las especies que aportan el alimento y la energía que se consume en el mundo, han sido seleccionadas y modificadas, a través de sucesivas generaciones de agricultores y fitomejoradores, mediante técnicas tradicionales de selección, cruzamiento e inducción de mutaciones. En los últimos años, la ingeniería genética se ha sumado como una herramienta complementaria, a las prácticas tradicionales de mejoramiento vegetal y ha hecho posible la obtención de los cultivos transgénicos, con beneficios para el productor, la sociedad y el medioambiente. A estos beneficios, se agrega que los productos derivados de los OGM's, son evaluados rigurosamente desde la inocuidad alimentaria y su seguridad para la salud y el ambiente antes de la introducción en el mercado (Sánchez, 2008).

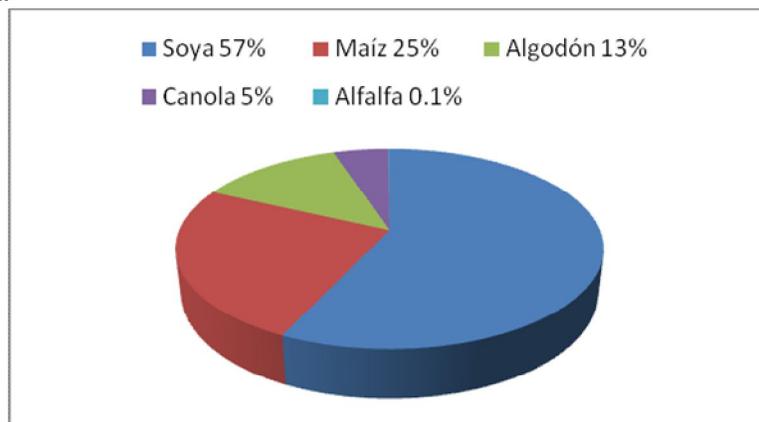
La primera generación de cultivos transgénicos, surgió como una herramienta tecnológica para otorgar ventajas a los productores. En general, estos cultivos fueron modificados para mejorar la expresión de caracteres de productividad, tales como la resistencia a insectos, virus, o tolerancia a herbicidas, o caracteres como maduración retardada. Algunos de estos cultivos fueron aprobados para su comercialización, cultivo y consumo en la década de los 90, y son los que se están comercializando actualmente. Numerosos proyectos en desarrollo involucran cultivos transgénicos resistentes a hongos y bacterias. Los cultivos de la segunda generación, ofrecen beneficios directos para la industria y los consumidores, y responden más bien a la necesidad de mejorar caracteres cualitativos. Dentro de estos cultivos se incluyen aquellos con resistencia a estrés abiótico (sequía,

salinidad, frío, etc.), los que brindan alimentos más sanos y nutritivos que los convencionales (maní hipoalergénico, arroz con betacarotenos, etc), los que producen mayor cantidad o mejor calidad de metabolitos de interés industrial (hidratos de carbono, ácidos grasos, aminoácidos), o los diseñados para ser usados como biorreactores de moléculas de interés farmacéutico (especialmente no producidas por las plantas como vacunas, anticuerpos), y/o de enzimas de interés industrial, (biopolímeros, etc.) (Sánchez, 2008).

Estos cultivos están hoy en ensayos de campo y su comercialización ocurrirá posiblemente en los próximos años. Aunque las distinciones suelen ser confusas al respecto, se menciona en algunos casos una tercera generación de cultivos transgénicos. En este caso las modificaciones genéticas, involucran cambios en la arquitectura de las plantas o en sus tiempos de desarrollo. Este tipo de cultivos, se encuentran todavía en etapa de investigación básica, aunque la introducción futura de tales modificaciones parece totalmente previsible. El 2005 marcó el décimo aniversario de la comercialización 30 de los cultivos genéticamente modificados (GM). Según el informe del Servicio para la Adquisición de Aplicaciones Agrobiotecnológicas (ISAAA), en el 2005, 21 países sembraron cultivos transgénicos en una superficie global estimada en 90 millones de hectáreas. Se agregaron durante 2005 cuatro nuevos países, como parte del aumento del 11% en el área global cultivada: Irán, República Checa, Francia y Portugal. Durante el 2006, según el nuevo informe de ISAAA, 22 países sembraron cultivos transgénicos (el nuevo país que se sumó es Eslovaquia) en una superficie global estimada en 102 millones de hectáreas (Sánchez, 2008).

Sánchez (2008) indica que en 2006 (Ilustración 3.18.), de los 102 millones de hectáreas sembradas con cultivos transgénicos:

1. el 57% correspondieron a soya,
2. el 25% a maíz,
3. el 13 % a algodón
4. el 5% a canola.
5. el 0,1% a alfalfa



### **Ilustración 3.18.** Distribución de los transgénicos en el mundo.

De los 102 millones de hectáreas de transgénicos:

- 1- 58 % se sembraron con cultivos tolerantes a herbicidas (maíz, canola, algodón y alfalfa transgénicos),
- 2- 18% se sembraron con cultivos Bt (algodón, maíz y soja)
- 3- 13% corresponden a cultivos de genes “acumulados” (se incorpora más de un rasgo en la misma planta por ingeniería genética, maíz y algodón TH y Bt).

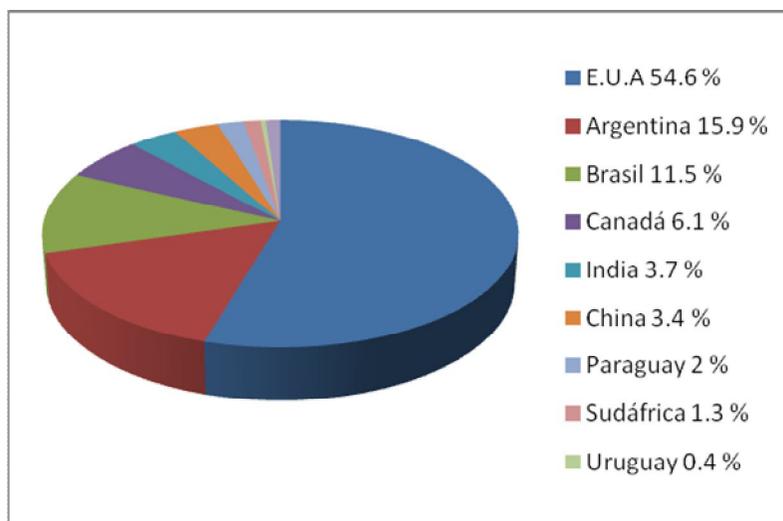
Los cultivos resistentes a virus (papaya y zapallo), representaron menos del 1% de las 102 millones de hectáreas sembradas con OGM (Sánchez, 2008).

Los cultivos predominantes en la siembra de 2006 continuaron, siendo la soja el cultivo biotecnológico más importante en 2006, ocupando 58,6 millones de hectáreas (57% de la superficie de cultivos biotecnológicos mundial), seguida por el maíz (25,2 millones de hectáreas y el 13%), el algodón (13,4 millones de hectáreas y el 5% de la superficie global de cultivos transgénicos) (Sánchez, 2008).

Actualmente, los países que siembran cultivos transgénicos son 22, de los cuales 11 son países industrializados y los otros 11 restantes son países en vías de desarrollo. A continuación se presenta el cuadro 3.7. con los países que cultivan más transgénicos (Ilustración 3.7.) (James, 2006).

**Cuadro 3.7.** Principales países productores de cultivos transgénicos.

No.	País	Millones de hectáreas	Cultivos
1	E.U.A	54.6	Soya, Maíz, Algodón, Canola, Calabaza, Papaya y Alfalfa
2	Argentina	15.9	Soya, Maíz y Algodón
3	Brasil	11.5	Soya y Maíz
4	Canadá	6.1	Canola, Maíz y soya
5	India	3.7	Algodón
6	China	3.4	Algodón
7	Paraguay	2.0	Soya
8	Sudáfrica	1.3	Maíz, Soya, Algodón
9	Uruguay	0.4	Maíz y Soya
10	Filipinas	0.20	Maíz
11	Australia	0.20	Algodón
12	Rumania	0.10	Soya
13	México	0.10	Algodón y Soya
14	España	0.10	Maíz
15	Colombia	<0.05	Algodón
16	Francia	<0.05	Maíz
17	Irán	<0.05	Arroz
18	Honduras	<0.05	Maíz
19	Rep. Checa	<0.05	Maíz
20	Portugal	<0.05	Maíz
21	Alemania	<0.05	Maíz
22	Eslovaquia	<0.05	Maíz



**Ilustración 3.19.** Principales países productores de transgénicos .

Cabe destacar:

1. En 2006 la alfalfa con tolerancia a herbicida, fue comercializado por la primera vez en los Estados Unidos. La alfalfa tolerante a herbicida, tiene la distinción de ser el primer cultivo transgénico perenne comercializado, y fue sembrado en 80.000 hectáreas, el equivalente del 5% de los 1,3 millones de hectáreas de alfalfa que se estima fueron sembrados en los Estados Unidos en 2006. El algodón con tolerancia a herbicida, fue lanzado en 2006, y ocupó una superficie substancial de más de 800.000 hectáreas en su primer año, plantado como característica única y como producto apilado con Bt, con el último ocupando a la mayoría de la superficie total sembrada. Las plantaciones se situaron principalmente en los Estados Unidos, con una superficie más modesta en Australia (Sánchez, 2008).

2. Notablemente en China, una papaya con resistencia a virus desarrollada en el país, un cultivo alimenticio/de fruta, fue recomendada para su comercialización a finales del 2006 (Sánchez, 2008).

En 2006, los Estados Unidos, seguidos de Argentina, Brasil, Canadá y China, continuaron siendo los principales productores de transgénicos en el mundo, con (Sánchez, 2008):

- 1). 53 millones de hectáreas sembradas en los Estados Unidos
- 2). 18 millones de hectáreas sembradas en Argentina
- 3). 11 millones de hectáreas sembradas en Brasil
- 4). 6 millones de hectáreas sembradas en Canadá
- 5). 4 millones de hectáreas sembradas en India
- 6). 3 millones de hectáreas sembradas en China

La experiencia de los primeros 10 años, entre 1996 y 2005, durante los cuales se sembró un total de más de 475 millones de hectáreas de cultivos transgénicos en 21 países, cumplió las expectativas de pequeños y grandes productores de países desarrollados y en desarrollo. El beneficio para los productores fue sustancial, independientemente del estrato social, económico o geográfico. Datos relevados en distintos países demuestran, que los cultivos transgénicos de primera generación cultivados hasta el momento, han otorgado ventajas respecto a sus contrapartes convencionales, que se ven traducidas en menor uso de agroquímicos, menores costos de producción, menor contaminación ambiental, simplificación de labores y mayor rendimiento, pero sin generar modificación de las características finales del producto que llega a los consumidores o a la industria (Sánchez, 2008).

James (2006), indica algunos objetivos del uso de cultivos genéticamente modificados, estos objetivos son:

- Aumentar la productividad de los cultivos, contribuyendo así a la alimentación, forrajes y fibras de seguridad, con beneficios para los productores, los consumidores y la sociedad en general.

- Conservación de la biodiversidad, como una tecnología de ahorro de la tierra capaz de una productividad mayor que en las actuales 1,5 millones de hectáreas de tierra cultivable, y por lo tanto se opone a la deforestación y la protección de la biodiversidad en los bosques y en otros santuarios de la biodiversidad in situ.
- Un uso más eficiente de insumos externos, contribuyendo así a un entorno más seguro y sistemas de agricultura más sostenible.
- Aumentar la estabilidad de la productividad y la producción para disminuir el sufrimiento durante las hambrunas debido a factores bióticos y abióticos en particular la sequía, que es el principal obstáculo para aumento de la productividad de los 1.5 millones de hectáreas de tierras cultivables en el mundo.
- Mejora de la economía, y las prestaciones sociales, alimentos, piensos y fibra, la seguridad y la mitigación de la pobreza extrema, el hambre y la desnutrición para la población rural depende de la agricultura en los países en desarrollo.
- la producción de biocombustibles basados en recursos renovables, lo que reducirá la dependencia de los combustibles fósiles, y por lo tanto contribuir a un medio ambiente más limpio y más seguro reduciendo los niveles de gases de efecto invernadero para mitigar el calentamiento global.

### 3.8.3. Situación de los cultivos transgénicos en México

Los cultivos básicos principales en México son el maíz, la soya, el algodón, de los cuales se han investigado y desarrollado muchas variedades genéticamente modificadas (Rodríguez y González, 2007).

La situación de México en relación a la siembra, importación y exportación de los cultivos transgénicos es muy variada. Desde 1988 se han realizado ensayos de PT con la primera solicitud para importar y cultivar en campo un jitomate resistente a insectos. En 1996 se autorizó el cultivo en un programa piloto de algodón en la comarca lagunera, desde entonces, ya para el 2000 casi el 100 % del algodón que se ha cultivado en esta zona ha sido transgénico. Con respecto a nuestro principal producto agrícola, el maíz, su homólogo transgénico ha sido motivo de gran debate, ya que México es considerado el lugar de origen, domesticación y donde existe una gran diversificación y variedad de especies. La siembra de maíz transgénico antes de 1998 era escasa, existían muy pocas variedades transgénicas que fueron probadas a nivel campo en escala muy pequeña y controlada (Rodríguez y González, 2007).

Desde la apertura comercial del TLCAN, la importación de cultivos básicos ha ido en aumento debido a la disminución en la producción nacional por factores como la falta de competitividad de los productores agrícolas, directamente relacionada con el elevado nivel

de subempleo y pobreza que prevalece. En 1990, el promedio mexicano anual de importación de los cultivos básicos era de 8.7 millones de toneladas; en 2000 fue 18.5 millones. EU ha sido nuestro principal proveedor cubriendo el 90 % de este abasto. Específicamente, el maíz antes del TLCAN lo más que se importó fueron 2.5 millones de toneladas anuales. En el 2000 se importó más del doble: 5, 222,760 toneladas y en 2001 aumentó un 15 % más, para llegar a 6.5 millones, para el 2002 bajó a 5.4 millones de toneladas, sin embargo siguen siendo cifras significativas y volúmenes muy altos. En volúmenes tan grandes de granos se pueden mezclar tanto variedades convencionales como híbridas, así como maíz genéticamente modificado y se sabe que los agricultores mexicanos han usado estas semillas en algunos casos. Esta forma de introducción de maíz transgénico y la consecuente mezcla con maíz local ha sido preocupación de diversas organizaciones nacionales por falta de control y la contaminación de maíz de especies nativas. La importación y consumo fue aprobado por la COFEPRIS (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios) a partir del 2002, todas para el maíz especie *Zea mays L* (Rodríguez y González, 2007).

A continuación se muestra el cuadro 3.8. con los productos de maíz aprobados en México

**Cuadro 3.8.** Transgénicos en México más producidos.

Año	Característica	Empresa desarrolladora
2002	Marca Roundup Ready tolerante al herbicida glifosato	Monsanto
	Marca Yieldgard resistente a insectos lepidopteros	Monsanto
	Resistente a insectos y a lepidópteros y tolerante al herbicida glufosina de amonio	Híbridos Pioneer
2003	Resistente a insectos, a coleópteros y a Kanamicina	Monsanto
	Resistente a insectos lepidópteros, solución faena, tolerante al herbicida glifosato	Monsanto
	Resistente a Diabrotica virgifera, Diabrotica berberi y Diabrotica virgifera zae	Híbridos Pioneer
2004	Resistente al gusano de la raíz ( <i>Diabrotica spp</i> ) y tolerante al herbicida glifosato	Monsanto
	Resistente a insectos y lepidópteros y tolerante al herbicida glufosinato de amonio	Híbridos Pioneer

### **3.9. SEQUÍA, UN RETO PARA LA AGRICULTURA**

La capacidad de las plantas para tolerar condiciones de sequía es crucial para la producción agrícola en todo el mundo (Umezawa *et al.* 2006).

No existe una definición exacta de qué es una sequía, así que se puede definir como la falta de disponibilidad de agua para cubrir las necesidades fundamentales de una cierta unidad social, es decir, no hay bastante agua para satisfacer los requerimientos de las plantas, animales y habitantes (Mora *et al.* 2008).

#### *3.9.1. Tipos de sequía*

Mora *et al.* (2008), indican que debemos diferenciar entre la sequía hidrológica como “permanencia del déficit hídrico” de una sequía “aparente” o sequía agrícola (cuando el agua no coincide con las épocas en que las necesidades agropecuarias lo exigen).

##### **3.9.1.1. Sequía agrícola**

Es de corta duración y afecta el ciclo vegetativo de las pasturas y los cultivos. En general no altera demasiado los balances hídricos anuales y un indicador es la baja del nivel freático (Mora *et al.* 2008).

##### **3.9.1.2. Sequía hidrológica**

Altera el balance hidrológico anual debido a su duración (permanencia de la carencia de lluvias) y los indicadores son: el descenso notable de la capa freática y sequía de las lagunas. Es extensa en superficie y no coexiste con la inundación. Puede morir la vegetación y comenzar la erosión eólica (Mora *et al.* 2008).

#### *3.9.2. La sequía en las plantas*

Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico es el crecimiento celular, por lo que la sequía reduce el área foliar y acelera la senescencia de hojas maduras, cuando ésta es severa (Davies y Zhang, 1991); asimismo, la transpiración y la fotosíntesis se abaten, debido a la reducción de la turgencia, al cierre estomático y al bloqueo de la difusión del CO<sub>2</sub> hacia el mesófilo (Kumar *et al.* 1994).

Según Larcher (1995) la resistencia a la sequía es la capacidad de las plantas para soportar periodos de déficit hídrico (Ilustración 3.20).



**Ilustración 3.20.** Sequía en la agricultura.

El progreso reciente ha sido hecho en nuestra comprensión de la expresión génica, la regulación de la transcripción y de transducción de señales en las respuestas de la planta a la sequía. Análisis moleculares y genómicos han facilitado el descubrimiento de genes y ha permitido a la ingeniería genética utilizar varios genes funcionales o reglamentarios para activar de forma particular o general vías relacionadas con la tolerancia a la sequía en las plantas (Umezawa *et al.* 2006).

Desde sus inicios en 1980 a la fecha, el mejoramiento de la resistencia a la sequía en México se ha basado en la fenología (escape o acoplamiento entre el ciclo biológico y la disponibilidad de humedad) y en el rendimiento en pruebas en múltiples localidades bajo condiciones de secano. Los efectos de la sequía con frecuencia se magnifican por la ocurrencia de otros estreses, tanto bióticos (i.e. pudriciones de raíz) como abióticos (i.e. altas temperaturas, baja fertilidad del suelo, etc.) (Acosta *et al.* 1999).

El mejoramiento de cultivares, para adaptación a ambientes adversos implica, el uso de metodologías de selección que permitan capitalizar al máximo la varianza genética aditiva, a la vez reducir la interacción Genotipo \* Ambiente (Zea *et al.* 1989). La interacción G \* A es frecuentemente descrita como la inconsistencia del comportamiento entre genotipos desde un ambiente a otro, y cuando ésta ocurre en gran proporción reduce el progreso genético de la selección (Yang y Baker, 1991; Magari y Kang, 1993).

La sequía es un estrés multidimensional que afecta a las plantas en varios niveles de su organización. Las respuestas de la planta a la sequía son muy complejas porque reflejan la integración de los efectos del estrés a todos los niveles de organización y a través del tiempo. Para el caso del mejoramiento genético, su principal objetivo es el rendimiento final, lo que simplifica o ignora muchos de los procesos fisiológicos de la adaptación a la sequía (White y Singh, 1991).

Ríos *et al.* (2008) menciona que la sequía es el factor ambiental que más afecta a la productividad agrícola. En la naturaleza existen algunas especies vegetales que evolutivamente han desarrollado mecanismos fisiológicos y moleculares para tolerar estreses bióticos y abióticos. No basta con considerar la cantidad de agua disponible en el suelo, sino que es muy importante tomar en cuenta las condiciones en que se halla esta agua, tales como la humedad relativa, las fuerzas osmóticas, la tensión de succión del suelo, etc.

La resistencia a sequía en la producción de planta de maíz está regida por fenómenos hereditarios, del medio ambiente y de la interacción genético-ambiental. El primer fenómeno se debe a la presencia de muchos genes que a su vez interaccionan entre sí: la interacción dentro de un mismo sitio cromosómico o dominancia de un gen sobre su alelo y la interacción entre sitios cromosómicos o epistasia. A su vez, los efectos de las interacciones dominantes y epistática trabajan con los efectos del ambiente; entre estos los más importantes son la presencia de lluvias, los rocíos y las lloviznas, la textura y la estructura del suelo, además de las labores agrícolas como cultivos, escardas y fertilización (Márquez *et al.* 2009).

Con el manejo de variedades genéticamente resistentes a la sequía, una vez desarrollados, sería una tecnología de bajos insumos económicos que serían fácilmente aceptables para los agricultores de escasos recursos, las tierras de secano, y la pequeña explotación (Saxena y O'Toole, 2000).

Umezawa *et al.* (2006) muestran el cuadro 3.9. en el cual se muestra una serie de especies modificadas genéticamente y el origen del gen que se ha introducido.

**Cuadro 3.9.** Características de los transgénicos con respecto a la sequía.

No.	Clasificación	Nombre del gen	Transgénico	Origen	Expresión	Experimento	Parámetro	Año
1	Fructanos	SacB	Tabaco	<i>B. subtilis</i>	CaMV35SP	5 -10% PEG (suelo)	Desarrollo de planta	1995
2	Trialosa	TPS1	Tabaco	<i>S. cerevisiae</i>	CaMV35SP	Desecación	FW. Supervivencia	1996
3	myo-Inositol	IMT1	Tabaco	<i>Uña de gato</i>	CaMV35SP	Retención de humedad	Fotosíntesis	1997
4	Prolina	P5CS	Arroz	<i>Vigna aconitifolia</i>	AIPC-ABA-Inducible	Retención de humedad	Desarrollo de brotes	1998
5	Trialosa	OtsA, OtsB	Tabaco	<i>E. Coli</i>	CaMV35SP	Limite en el suministro hídrico	Productividad	1998
6	Fructanos	SacB	Remolacha azucarera	<i>B. subtilis</i>	CaMV35SP	Limite en el suministro hídrico	Producción de biomasa	1999
7	Glicina betaína	COX	Arabidopsis, canola y tabaco	<i>A. pascens</i>	CaMV35SP	Limite en el suministro hídrico	Desarrollo de brotes	2000
8	Galactinol	AtGolS2	Arabidopsis	<i>Arabidopsis</i>	CaMV35SP	Retención de humedad	Supervivencia	2002

No.	Clasificación	Nombre del gen	Transgénico	Origen	Expresión	Experimento	Parámetro	Año
9	Trialosa	TPSP	Arroz	<i>E. Coli</i>	ABA-indcible/rbcSP	Retención de humedad	Fotosíntesis	2003
10	Trialosa	TPSP	Arroz	<i>E. Coli</i>	Maíz Ubi-1P	Limite en el suministro hídrico	Fotosíntesis	2003
11	Manitol	mtlD	Trigo	<i>E. Coli</i>	Maíz Ubi-1P	Limite en el suministro hídrico	Biomasa	2003
12	Poliaminas	ADC	Arroz	<i>D. Stramonium</i>	Maíz Ubi-1P	"= % Peg (suelo)	Crecimiento de brotes	2004
13	Poliaminas	SPDS	Arabidopsis	<i>C. ficifolia</i>	CaMV35SP	Retención de humedad	Crecimiento del brote	2004
14	Prolina	P5CS	Petunia	<i>Arabidopsis</i> , <i>Arroz</i>	CaMV35SP	Retención de humedad	Supervivencia	2005
15	Trialosa	TPS1	Jitomate	<i>S. cerevisiae</i>	CaMV35SP	Retención de humedad	Desarrollo de brotes	2005

Para mejorar los caracteres cuantitativos, es decir, aquellos determinados por muchos genes con efectos acumulativos para la resistencia a sequía, es menester que en el ambiente de selección se manifiesten en grado extremo las condiciones que favorecen el factor adverso, en este caso la sequía. Así como que las condiciones de adversidad sean lo más homogéneas posible a fin de evitar "escapes" de plantas aparentemente resistentes (Márquez *et al.* 2009).

### 3.9.3. Mejoramiento de cultivos ante condiciones de estrés hídrico

Castañón *et al.* (2000) mencionan que mejorar para tolerar el déficit hídrico no es una tarea fácil, ya que éste se considera como un carácter de herencia cuantitativa. Por lo que para tener mayor avance en el mejoramiento por resistencia a sequía, se han aplicado diferentes índices de selección. El principal objetivo del mejoramiento de cultivos tanto en ambiente de alto potencial como en ambientes con estrés hídrico es la maximización del rendimiento. La detección y utilización de rasgos secundarios es muy importante para la selección de los individuos superiores en ambientes con limitaciones hídricas.

Según Bruce *et al.* (2002) para que un rasgo o carácter sea considerado de interés por un programa de mejoramiento ante condiciones de sequía debe cumplir con cuatro características básicas, estas son:

1. Poseer variabilidad en su expresión y dicha expresión debe estar asociada positivamente al rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico.
2. Ser altamente heredable.
3. Ser fácilmente identificable la presencia o no, de dicho carácter y su expresión en diferentes ambientes (Fenotipo).
4. No debe estar asociado a pérdidas de rendimiento bajo condiciones hídricas ideales de crecimiento.

Experiencias del CIMMYT en maíz indican a la esterilidad reducida, a la sincronía floral (ASI) y el mantenimiento de la fotosíntesis durante la maduración (staygreen) como los rasgos secundarios claves para la mejora en tolerancia a sequía y en menor medida el leaf rolling o acartucamiento foliar (Bänzinger *et al.* 2000).

La complejidad de los procesos asociados con la tolerancia a sequía y la selección de los individuos superiores sugiere la necesidad de integrar el trabajo de mejoradores, fisiólogos y genetistas moleculares (Chapman *et al.* 2002; Campos *et al.* 2004; Edmeades *et al.* 2004; Ishitani *et al.* 2004; White *et al.* 2004).

#### 3.9.4. Mejoramiento asistido de cultivos a la tolerancia a sequía

Ishitani *et al.* (2004) proponen una estrategia para el estudio de la tolerancia a estrés abiótico que consiste en la aproximación de arriba hacia abajo, desde el análisis de los fenotipos que aparecen a partir de la expresión de los genes de la planta en ambientes con estrés hídrico hasta la selección de los genes candidatos a ser usados para generar los trasgenes.

El proceso de selección de los genes candidatos, parte de un recurso genético amplio que en algunos casos pueden ser decenas de miles de genes. A través de estudios fisiológicos y agronómicos se hace una primera gran selección en donde se buscan los genotipos que presenten características contrastantes de respuesta a las sequías (susceptibles y tolerantes). Luego se utilizan las técnicas de microarreglos sobre los individuos seleccionados, a través de los cuales se estudia la expresión de los genes (genética funcional) involucrados en la respuesta. Los genes seleccionados se utilizarán para generar transgenes que van a ser transferidos a otros individuos y mejorar así los cultivos. La intensidad, el momento y el lugar de la expresión del transgen se logran utilizando un promotor adecuado (Umezawa *et al.* 2007).

Muchos trabajos de los últimos años tales como los de Umezawa *et al.* (2006), Valliyodan y Nguyen (2006), Fujita *et al.* (2006) y Seki *et al.* (2007) intentan dar claridad sobre los complejos sistemas que regulan la expresión de la tolerancia a sequía. Fundamentalmente estos trabajos demuestran cuales son los genes que regulan los procesos de respuestas al estrés hídrico. Estos autores coinciden que se pueden utilizar genes que afectan la respuesta al estrés hídrico a tres niveles:

1. Transducción de la señal del estrés.
2. Factores de transcripción de dicha señal.
3. Proteínas funcionales responsables de la respuesta al estrés.

Existen numerosos ejemplos de genes aislados, clonados e introgresados en diferentes especies de interés productivo para los tres niveles. En la membrana celular existen proteínas reguladoras involucradas en la fosforilación/defosforilación (quinasas), metabolismo de fosfolípidos, sensibilidad al calcio (sensores de calcio) y degradación de

proteínas estructurales. Estas proteínas transmiten las señales percibidas desde el exterior al interior de la célula. La cascada de proteínas quinasas activadas por nitrógeno llamadas MAP-quinasas son reguladores centrales de muchos procesos celulares y entre estos la respuesta a estrés abiótico y biótico (Umezawa *et al.* 2006).

Fujita *et al.* (2006) han estudiado estos sistemas y han propuesto una posible convergencia entre la señalización de ambos estreses a través de especies reactivas de oxígeno (ROS) las cuales desencadena la síntesis de fitohormonas, tales como el ácido salicílico (SA), el ácido jasmonico (JA), el etileno (ET) y el ácido abscísico (ABA). El ABA es más asociado a la señalización de respuesta a estrés abiótico mientras que el SA, JA y ET están relacionados a la señalización de respuesta a estrés biótico. Las ROS tienen un efecto de señalización sobre la expresión de factores de transcripción al igual que las fitohormonas, pero las ROS juegan un papel muy importante porque son las responsables de la rápida respuesta al estrés que tienen algunos mecanismos. El inconveniente que presentan las ROS es que cuando se acumulan (y las condiciones de estrés generan muchas ROS) son nocivas para la células, pero para esto la célula también cuenta con algunas enzimas limpiadoras de ROS como lo son la superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa y la ascorbato peroxidasa. Algunas de estas enzimas limpiadoras de ROS han sido utilizadas por la ingeniería genética para generar plantas transgénicas mejoradas con mayor contenido de estas enzimas limpiadoras para que ayuden a realizar la tolerancia a estrés.

A través de la tecnología de los microarreglos se ha podido analizar los transcritos de los genes que se expresan ante condiciones de estrés hídrico y se han encontrado al menos una docena de factores de transcripción (TFs) involucrados en dicha respuesta. Los genes que codifican a los TFs tienen una acción activadora sobre otros genes y otros una acción represora pero todos aportan a la expresión de la tolerancia al estrés. Muchos de estos genes pueden ser inducidos mediante tratamientos exógenos de ABA (sistema regulatorio y de transcripción ABA-dependiente) y otros no (sistema regulatorio y de transcripción ABA-independiente) (Seki *et al.* 2007).

El estrés hídrico también induce a varias respuestas bioquímicas y fisiológicas en la planta. Muchos estudios bioquímicos-fisiológicos, en los cuales se han sometido a diversas especies de plantas a condiciones de estrés hídrico, han demostrado la acumulación de algunos compuestos tales como azúcares (rafinosa, sacarosa y trehalosa), azúcares reducidos o azúcares-alcoholes (sorbitol y manitol), aminoácidos (prolina) y aminos (glicina-betaína y algunas poliaminas). Estos metabolitos tienen funciones de osmolitos o de osmoprotectores que permiten reducir el potencial agua en la célula y de antioxidantes o limpiadores de especies reactivas de oxígeno. La acumulación de estos metabolitos ayuda a la planta a hacer frente al estrés ya que se asocian a la protección de la función celular y el mantenimiento de las estructuras celulares. Sin embargo muchas plantas pierden la capacidad de sintetizar estos metabolitos cuando son expuestas a condiciones de estrés hídrico y son las que denominamos plantas sensibles a la sequía. La ingeniería genética puede ayudar a mejorar el comportamiento de esas

especies ante la sequía usando genes que codifican a la biosíntesis de esos metabolitos de especies que si los poseen y transferirlos mediante transgénesis a las especies a ser mejoradas. Ya hay muchos casos registrados de plantas mejoradas mediante esta vía (Seki *et al.* 2007).

Valliyodan y Nguyen (2006) clasifican a los esfuerzos en encontrar plantas con tolerancia a sequía en dos grandes grupos, uno en el cual se focalizan en entender los mecanismos y encontrar los genes involucrados en la señalización del estrés y otro en los cuales se apunta a encontrar las rutas metabólicas asociadas a la acumulación de metabolitos osmoprotectores.

### 3.9.5. Mecanismos de resistencia a la sequía

Las plantas son sésiles y han tenido que desarrollar diversos mecanismos para que les permitan adaptarse a condiciones ambientales cambiantes. Se han desarrollado dos estrategias para resistir la sequía: tolerancia a la sequía y escape de la deshidratación (Cominelli y Tonelli, 2010).

El escape a la deshidratación se refiere a la capacidad de la planta para mantener un estado hídrico alto, incluso cuando el agua es escasa, por ejemplo, echando raíces largas que penetran profundamente a la humedad del suelo, o reduciendo la pérdida de agua mediante la restricción de la apertura de los estomas en la superficie de las hojas. De hecho los estomas juegan un papel importante en la adaptación de las plantas al estrés (Cominelli y Tonelli, 2010).

El escape es la capacidad fisiológica de la planta para escapar al efecto de la sequía, completando su ciclo vegetativo antes de que se presente el estrés de humedad (Caraballo, 2003).

La tolerancia a la sequía está bien ilustrada por la 'resurrección de plantas' capaces de soportar la pérdida de alrededor del 90% de su contenido de agua y aún siguen siendo viables y vuelven a crecer cuando regresan las condiciones hídricas, la mayoría de otras plantas pueden soportar sólo la deshidratación moderada (alrededor del 30% de pérdida de agua). Programas de mejoramiento en general han optado por mejorar el escape a la deshidratación en lugar de la tolerancia a la deshidratación como estrategias para la producción de nuevas variedades capaces de hacer frente a la sequía (Cominelli y Tonelli, 2010).

Al menos seis vías de transducción de señal en las plantas están involucradas en las respuestas a la sequía y están estrechamente relacionadas con las respuestas a un alto estrés salino y frío. El ácido abscísico, hormona sintetizada en respuesta al estrés abiótico, juega un papel clave en tres de estas vías (Cominelli y Tonelli, 2010).

El esclarecimiento de los mecanismos involucrados en las respuestas al estrés ha proporcionado información valiosa sobre como las plantas responden a un estrés abiótico, estos podrían mejorarse mediante la ingeniería genética (Cominelli y Tonelli, 2010).

Cominelli y Tonelli, (2010) indican que a raíz de la aplicación de la tecnología de chips de ADN, varios cientos de genes inducidos por estrés, sobre todo en la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, han sido identificados como candidatos para la manipulación y han sido clasificados en tres grupos:

1. Genes que codifican proteínas con una función enzimática conocida o estructural.
2. Genes con funciones aún desconocidas.
3. Genes reguladores, como los que codifican para quinasas, fosfatasa y factores de transcripción.

Numerosos estudios han investigado los mecanismos de la resistencia a la sequía en la fase vegetativa, y estos estudios son importantes para mejorar la resistencia en las plantas sometidas a un continuo o sub-continuo déficit hídrico. Sin embargo, para los principales cereales, la resistencia a la sequía es más importante en la etapa reproductiva, para asegurar polen fértil y el desarrollo del grano, y los estudios más recientes están por lo tanto centrados en la identificación de genes que se pueden modificar para mejorar la tolerancia a la sequía en esta etapa crucial (Cominelli y Tonelli, 2010).

La magnitud del efecto depende de la intensidad, duración y respuesta de la variedad a la sequía destacándose las de ciclo corto por una mayor eficiencia en el uso del agua, asociando la resistencia a cuatro mecanismos: escape, evitación, tolerancia y recuperación (Caraballo, 2003).

#### 3.9.5.1. Escape

Capacidad fisiológica de la planta para escapar al efecto de la sequía, completando su ciclo vegetativo antes de que se presente el estrés de humedad (Caraballo, 2003).

#### 3.9.5.2. Evitación

Es la propiedad genético-fisiológica de la planta para evitar los efectos de la sequía por dos vías importantes: mantener el nivel de hidratación de los tejidos a causa del desarrollo de sus raíces profundas y reducción del flujo de agua de los tejidos, tallos y hojas; disminuir la pérdida de agua debido al rápido cierre de los estomas y enrollamiento de sus hojas (Caraballo, 2003).

#### 3.9.5.3. Tolerancia

Habilidad del citoplasma de las células para sobrevivir y funcionar normalmente aunque los tejidos de la planta se dessequen o tengan potenciales de agua reducidos, a fin de

poder soportar el déficit de presión y difusión de la misma. Es la resultante de interacciones fisiológicas complejas que involucran procesos de osmorregulación (Caraballo, 2003).

#### 3.9.5.4. Recuperación

Es la habilidad genéticofisiológica de las plantas para reanudar su desarrollo fenológico después de un período de carencia de humedad del suelo; la velocidad con que se presenta está asociada al mayor contenido de agua o potencial hídrico, es decir la velocidad de recuperación es proporcional al potencial de agua en las vainas y las hojas; y esta recuperación puede registrarse en cualquiera de las etapas fenológicas (Caraballo, 2003).

#### 3.9.6. Los cultivos y la sequía

##### 3.9.6.1. Maíz

La tolerancia a la sequía hace un llamamiento a una gran cantidad de elementos moleculares. Esta complejidad es tanto más importante en el maíz cuya sensibilidad a ciertos períodos en su ciclo de desarrollo complica aún más el trabajo de los mejoradores (Gaufichon, *et al.* 2010).

Esto lleva un largo camino para explicar las dificultades que se experimentaron en programas de investigación y los considerables retrasos antes de su puesta en el mercado. No existe una solución "una bala de plata" desarrollada mediante la introducción de un solo gen o la introgresión de un solo QTL, y nunca la habrá. Las soluciones siguen llegando de la introducción de varias características a través de la transgénesis y/o reproducción estándar. Los criadores están hablando cada vez más de la acumulación de genes. Por otra parte, la formación de los objetivos está determinada por los sistemas de cultivo que se enfrentan (Gaufichon *et al.* 2010).

El maíz transgénico (Ilustración 3.21.), para su comercialización en breve por Monsanto y BASF en los Estados Unidos sólo contiene un transgen. Sin embargo, ambas empresas continúan activamente para identificar y probar otros genes involucrados en mejora de tolerancia a la sequía, y han anunciado la publicación de otro competidor molecular en un futuro no muy lejano (Gaufichon *et al.* 2010).

La próxima generación de plantas transgénicas tolerantes al estrés por falta de agua será el resultado de los programas de investigación como éste o similares DTII, llevada a cabo por Pioneer, con el objetivo de encontrar la mejor combinación de genes (probablemente 2 a 5) para la optimización de los rendimientos en condiciones de déficit hídrico. Es importante mencionar que las variedades de maíz transgénico también integrarán a los herbicidas y genes resistentes a los insectos, que son las tecnologías que ya han sido

comercializados por la mayoría de las empresas de semillas importantes en los últimos años y que corresponden a una demanda por los agricultores, especialmente en los EE.UU (Gaufichon *et al.* 2010).



**Ilustración 3.21.** Maíz transgénico.

#### 3.9.6.2. Arroz

El arroz (Ilustración 3.22.), es un ejemplo de la increíble diversidad genética criada por el hombre en el cultivo de plantas, desde su domesticación. Decenas de miles de variedades de semillas de arroz se conservan en bancos de germoplasma nacionales e internacionales. El Organismo Internacional de Investigación sobre el Arroz (IRRI), con sede en Filipinas, por sí sola tiene más de 100,000 muestras de dos especies de arroz cultivado (Gaufichon *et al.* 2010).



**Ilustración 3.22.** Arroz transgénico.

Como resultado de su capacidad económica y del tamaño relativamente pequeño de su genoma, la comunidad científica internacional decidió hacer del arroz un modelo de las plantas en la genética vegetal. Su secuenciación del genoma fue terminado en 2005 gracias a un esfuerzo de investigación internacional y la fundación del Consorcio IRGSP (Internacional de Secuenciación del Genoma del proyecto Arroz) en 1999 (Gaufichon *et al.* 2010).

El Arroz reacciona ante el estrés hídrico de la misma manera como lo hacen la mayoría de los cereales, la creación de una evasión, la evasión o la estrategia de la tolerancia de acuerdo al tipo de la sequía en cuestión, la evitación o la estrategia de tolerancia en función del tipo de la sequía en cuestión (Gaufichon *et al.* 2010).

Al igual que el maíz, la fase de desarrollo más sensibles a estrés hídrico durante el desarrollo son pocos días antes y después de la floración (Gaufichon *et al.* 2010).

Sin embargo, por el momento, los proyectos de investigación se dirigen a una variedad de criterios tales como: (i) modificación del crecimiento de las raíces en caso de estrés hídrico, especialmente en el arroz acuático (cultivo en aguas profundas), (ii) el ajuste osmótico, (iii) la modificación de las hojas (para regular la superficie foliar y limitar la transpiración estomatal), (iv) el uso eficiente del agua y (v) la sincronización de los ciclos de cultivo (Gaufichon *et al.* 2010).

### 3.9.6.3. Sorgo

El Sorgo, al igual que otras especies de verano como el girasol o la cebada, destaca por su tolerancia a la sequía fuerte, intrínseca con la producción un nivel aceptable de rendimiento incluso sin riego. El sorgo (Ilustración 3.23.), es una especie con

un metabolismo C4, como el maíz, lo que ayuda a regular de manera eficiente la apertura de los estomas de acuerdo a las condiciones ambientales. Sin embargo, al igual que el maíz, es muy sensible a la sequía durante su etapa reproductiva (Gaufichon *et al.* 2010).



**Ilustración 3.23.** Sorgo transgénico.

El Fotoperiodismo y la etapa verde son dos criterios genéticos elegidos por los mejoradores para optimizar directa o indirectamente los rendimientos de sorgo bajo condiciones de estrés hídrico. Otras posibilidades se están estudiando, especialmente como parte del Programa Generación Desafío (Gaufichon *et al.* 2010).

El CIRAD está interesado en el fotoperiodismo del sorgo. El Fotoperiodismo es una adaptación de ciertas plantas en donde sólo pueden florecer cuando hay suficiente luz continua. Este rasgo, que podría ser visto como una adaptación a la sequía, se produce al final del ciclo de cultivo. Se trata de una sincronización del ciclo de desarrollo vegetal con la temporada de lluvias, y esto independientemente de la fecha de siembra, muy variable en algunas partes de las zonas tropicales, ya que está relacionada con el inicio de la temporada de lluvias. El Fotoperiodismo ayuda a sincronizar la floración de la planta con el fin de la temporada de lluvias, asegurando un final más fácil de su ciclo y evitar condiciones de estrés hídrico (Gaufichon *et al.* 2010).

La etapa verde consiste en el mantenimiento de una cierta cantidad de hojas verdes después de floración para asegurar que los granos tendrán compuestos adecuados de nitrógeno y azúcares (Gaufichon *et al.* 2010).

#### 3.9.6.4. Trigo

Con una producción anual mundial de unos 600 millones de toneladas, el trigo es el cereal más cultivado y consumido la mayor parte por el hombre (Gaufichon *et al.* 2010).

Si bien hay varios tipos de trigo, dos tipos gozan de la condición económica importante:

- El trigo duro (*Triticum turgidum* ssp *durum*) se cultiva sobre todo en zonas secas, calientes o en el sur de Europa o el norte de África. Con un alto contenido de gluten, que se utiliza en la elaboración de sémola y pasta.
- Trigo de primavera o de trigo pan (*Triticum aestivum*), es la más cultivada, es producido en zonas más templadas del continente americano y en Europa del Norte para producir trigo panificable.

El trigo es una especie de invierno o primavera (Ilustración 3.24.). En cualquier caso, a pesar de que la fecha de siembra ocurre en diferentes momentos, la cosecha se lleva a cabo antes del verano. Así que el ciclo del cultivo de trigo se lleva a cabo en su mayor parte durante un período del año en que el riesgo por deficiencia de agua es bajo. Esto es una estrategia de evasión. El trigo tiene buena tolerancia en general, y la eficiencia de agua en cuanto al uso es de buena calidad, relacionados a las demandas de baja transpiración durante su ciclo vegetativo (Gaufichon *et al.* 2010).



**Ilustración 3.24.** Trigo Transgénico.

Sin embargo, para las zonas que sufren una grave sequía, como Australia, la eficiencia del agua es un criterio genético que se elige para mejorar la tolerancia a la sequía en el trigo. Australia, ha logrado, mediante la discriminación isotópica del proceso de fotosíntesis como un criterio fenotípico, en el mejoramiento de trigo mostrando una conductancia estomática y una alta eficiencia de uso de agua, proporcionando un aumento significativo del rendimiento en condiciones particularmente seco (Gaufichon *et al.* 2010).

#### 3.9.6.5. Frijol

El mejoramiento genético representa una de las mejores opciones e inversiones para incrementar y estabilizar el rendimiento en estas condiciones, a pesar del costo y del tiempo requerido para el desarrollo de nuevas variedades (Singh, 1985).

El mejoramiento genético para resistencia a sequía en frijol se ha basado en métodos tradicionales que requieren la evaluación de numerosos genotipos, para incrementar las probabilidades de identificar y seleccionar los de comportamiento superior en las condiciones de selección (Ilustración 3.25.). A pesar de sus limitaciones, esos métodos han sido útiles ya que han permitido desarrollar variedades de comportamiento agronómico superior al de las variedades criollas tradicionales (Rosales *et al*, 2000).



**Ilustración 3.25.** Frijol transgénico.

Una forma de lograr avances en el mejoramiento genético para adaptación a sequía en esta especie consiste en seleccionar genotipos cuya diferencia de rendimiento de grano obtenido con riego suplementario respecto al obtenido en secano, sea reducida (Ramírez, 1992).

Es recomendable que la selección de genotipos con alto potencial de rendimiento y adaptación a condiciones de sequía se efectúe mediante la combinación de criterios relacionados tanto con el rendimiento promedio de ambas condiciones de humedad (media geométrica e índice de eficiencia relativa), como con los que involucran la reducción del rendimiento al pasar del riego a sequía (índice de susceptibilidad a sequía y porcentaje de pérdida de rendimiento). Además, es necesario considerar características fenológicas como el ajuste de la floración y de la madurez con respecto a los patrones de disponibilidad de humedad y de temperatura, así como la alta producción y la eficiencia en la distribución de biomasa (Rosales *et al*, 2000).

## 4. ACTUALIZACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO PARCELARIO

Se ha realizado la actualización del programa para la Evaluación de Riego Parcelario versión 1.2, que fue programado en Visual Basic, y esta versión fue programada en Java, “Programa para la Evaluación de Sistemas de Riego Parcelario”, ESIRPA.

El Software “Programa para la Evaluación de Sistemas de Riego Parcelario” es una herramienta que permite a los usuarios de riego mayor velocidad de respuesta para la resolución de problemas, en particular se cubre uno de los requerimientos para lograr sistematizar la información sobre la evaluación de los sistemas de riego.

En él se presenta una descripción detallada de cada uno de los elementos del programa, para facilitar su comprensión y lograr una mayor eficiencia y rapidez para el usuario.

### 4.1. CONTENIDO DEL SISTEMA

#### 4.1.1. Menú Principal

En la ventana principal (Ilustración 4.1) se indica el nombre “Programa para la Evaluación de Sistemas de Riego Parcelario”, en la misma pantalla se tiene la barra de menú, donde se pueden ingresar las evaluaciones de riego por gravedad y riego por goteo.

Al tomar cualquiera de éstas dos opciones se despliega la lista de funciones con información correspondiente a cada uno de los sistemas de riego.



Ilustración 4.1. Menú principal del programa.

#### 4.1.2. Sistema de Riego por Gravedad

Al seleccionar la opción “Riego por Gravedad” la ventana nos muestra las funciones del programa para el sistema de riego por gravedad las cuáles se enlistan a continuación (Ilustración 4.2).

Funciones del sistema de riego por gravedad:

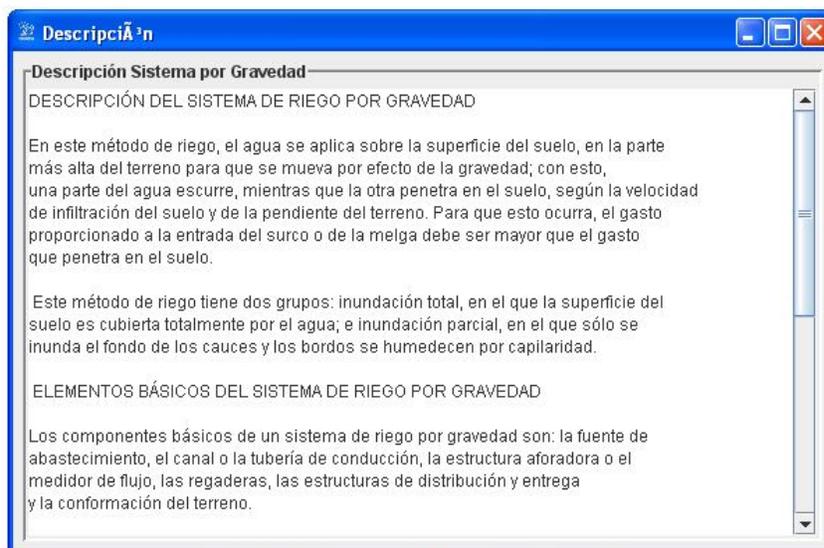
- a) Descripción del Sistema.
- b) Procedimiento de Evaluación.
- c) Uniformidad y Eficiencia.



**Ilustración 4.2.** Detalles de menú Riego por Gravedad.

##### a) Descripción del Sistema

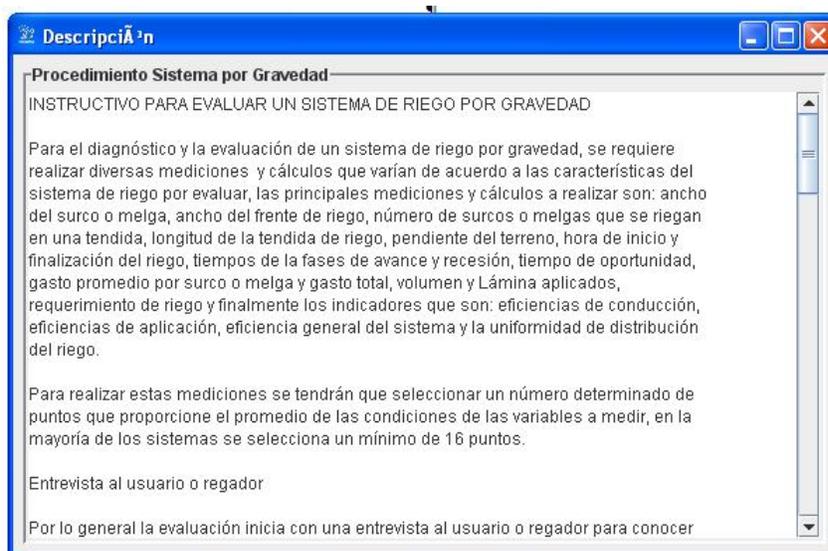
En la opción “Descripción del Sistema” nos mostrará las características del sistema de Riego por Gravedad (Ilustración 4.3), de la cual se puede leer el contenido completo de la descripción moviendo la barra de desplazamiento vertical.



**Ilustración 4.3.** Descripción del sistema de Riego por Gravedad.

#### b) Procedimiento de Evaluación

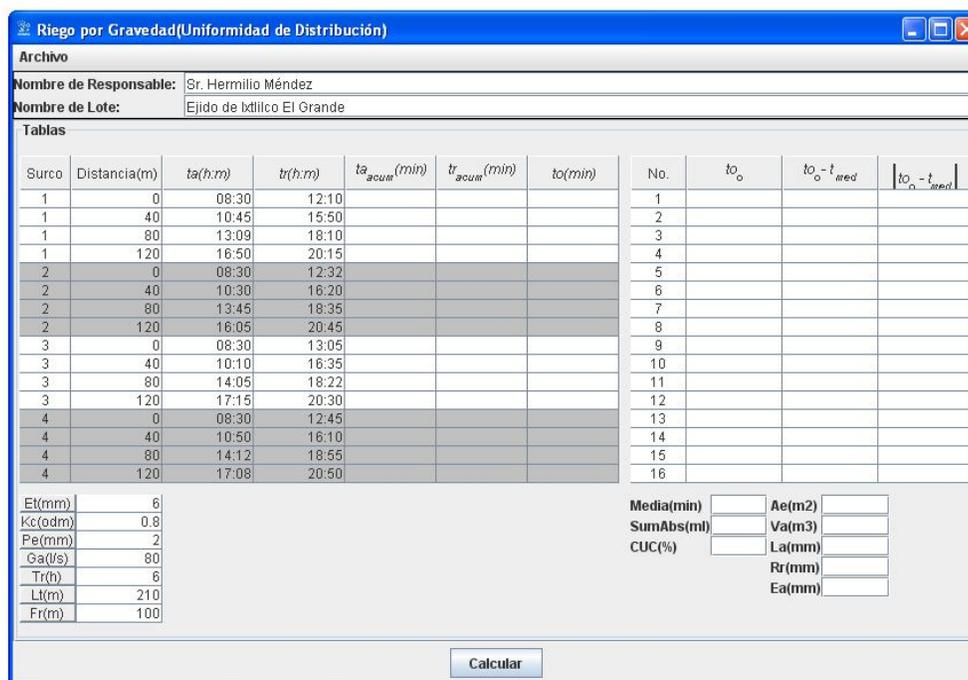
Al seleccionar la opción “Procedimiento de Evaluación” nos dará una descripción del procedimiento de evaluación del sistema de Riego por Gravedad (Ilustración 4.4), de la cual se puede leer el contenido completo moviendo la barra de desplazamiento vertical.



**Ilustración 4.4.** Procedimiento de Evaluación del sistema de Riego por Gravedad.

### c) Uniformidad y Eficiencia

En la ventana de Uniformidad y Eficiencia se capturan los datos generales de la evaluación, de izquierda a derecha, en la columna 1 se muestran los números de surco ó melga, en los cuáles se hicieron las mediciones, en la columna 2 se ingresará la Distancia, en la columna 3, se ingresará el tiempo de avance ( $t_a$ ) y en la columna 4 el tiempo de recesión ( $t_r$ ), estos tiempos se ingresarán en horas y minutos. En las celdas de la parte inferior se ingresan los siguientes datos: Evapotranspiración ( $E_t$ ), Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), Precipitación efectivo ( $P_e$ ), Gasto aplicado ( $G_a$ ), Tiempo de riego ( $T_r$ ), Longitud de tendida de riego ( $L_t$ ) y Frente de riego ( $F_r$ ), Ilustración 4.5.



**Riego por Gravedad(Uniformidad de Distribución)**

Archivo

Nombre de Responsable: Sr. Hermilio Méndez

Nombre de Lote: Ejido de Ixtlilco El Grande

Tablas

Surco	Distancia(m)	$t_a$ (h.m)	$t_r$ (h.m)	$t_{a\text{ acum}}$ (min)	$t_{r\text{ acum}}$ (min)	$t_o$ (min)	No.	$t_{o_0}$	$t_{o_0} - t_{med}$	$ t_{o_0} - t_{med} $
1	0	08:30	12:10				1			
1	40	10:45	15:50				2			
1	80	13:09	18:10				3			
1	120	16:50	20:15				4			
2	0	08:30	12:32				5			
2	40	10:30	16:20				6			
2	80	13:45	18:35				7			
2	120	16:05	20:45				8			
3	0	08:30	13:05				9			
3	40	10:10	16:35				10			
3	80	14:05	18:22				11			
3	120	17:15	20:30				12			
4	0	08:30	12:45				13			
4	40	10:50	16:10				14			
4	80	14:12	18:55				15			
4	120	17:08	20:50				16			

$E_t$ (mm)	6	Media(min)	<input type="text"/>	$A_e$ (m2)	<input type="text"/>
$K_c$ (odm)	0.8	SumAbs(ml)	<input type="text"/>	$V_a$ (m3)	<input type="text"/>
$P_e$ (mm)	2	CUC(%)	<input type="text"/>	$L_a$ (mm)	<input type="text"/>
$G_a$ (l/s)	80			$R_r$ (mm)	<input type="text"/>
$T_r$ (h)	6			$E_a$ (mm)	<input type="text"/>
$L_t$ (m)	210				
$F_r$ (m)	100				

Calcular

**Ilustración 4.5.** Uniformidad de Distribución del sistema de Riego por Gravedad.

Finalmente se da clic en la opción “Calcular”, se toman como referencia los datos que han sido ingresados anteriormente para obtener los siguientes resultados: en la columna 5 los tiempos de avance acumulados ( $t_{a\text{ acum}}$  (min)), en la columna 6 los tiempos de recesión acumulados en minutos ( $t_{r\text{ acum}}$  (min)), en la columna 7 los tiempos de oportunidad ( $t_o$  (min)), En la columna 8 se muestra la numeración de los tiempos captados, en la columna 9 los tiempos de oportunidad ordenados en minutos ( $t_{o_0}$ ), y los valores absolutos del tiempo de oportunidad medio ( $t_{med}$ ).

En la parte inferior derecha se muestran los siguientes datos: la Media, Suma de los valores Absolutos (Sum Abs (ml)), el porcentaje del Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Área de la tendida de riego ( $A_e$  ( $m^2$ )), Volumen aplicado a la tendida de riego ( $V_a$  ( $m^3$ )), Lámina aplicada ( $L_a$  (mm)), Requerimiento de riego ( $R_r$  (mm)) y Eficiencia de aplicación parcelaria ( $E_a$  (mm)). (Ilustración 4.6).

Riego por Gravedad(Uniformidad de Distribución)													
Archivo													
Nombre de Responsable:		Sr. Hermilio Méndez											
Nombre de Lote:		Ejido de Ixtitlico El Grande											
Tablas													
Surco	Distancia(m)	$t_a$ (h:m)	$t_r$ (h:m)	$t_{a\text{ acum}}$ (min)	$t_{r\text{ acum}}$ (min)	$t_o$ (min)	No.	$t_o$	$t_o - t_{med}$	$ t_o - t_{med} $			
1	0	08:30	12:10	0	220	220	1	195	-79.0625	79.0625			
1	40	10:45	15:50	135	440	305	2	205	-69.0625	69.0625			
1	80	13:09	18:10	279	580	301	3	220	-54.0625	54.0625			
1	120	16:50	20:15	500	705	205	4	222	-52.0625	52.0625			
2	0	08:30	12:32	0	242	242	5	242	-32.0625	32.0625			
2	40	10:30	16:20	120	470	350	6	255	-19.0625	19.0625			
2	80	13:45	18:35	315	605	290	7	257	-17.0625	17.0625			
2	120	18:05	20:45	455	735	280	8	275	0.9375	0.9375			
3	0	08:30	13:05	0	275	275	9	280	5.9375	5.9375			
3	40	10:10	16:35	100	485	385	10	283	8.9375	8.9375			
3	80	14:05	18:22	335	592	257	11	290	15.9375	15.9375			
3	120	17:15	20:30	525	720	195	12	301	26.9375	26.9375			
4	0	08:30	12:45	0	255	255	13	305	30.9375	30.9375			
4	40	10:50	16:10	140	460	320	14	320	45.9375	45.9375			
4	80	14:12	18:55	342	625	283	15	350	75.9375	75.9375			
4	120	17:08	20:50	518	740	222	16	385	110.9375	110.9375			
Et(mm)		6		Media(min)		274.06		Ae(m2)		21000.00			
Kc(odom)		0.8		SumAbs(ml)		644.88		Va(m3)		1536.00			
Pe(mm)		2		CUC(%)		85.29		La(mm)		73.10			
Ga(l/s)		80						Rr(mm)		4.80			
Tr(h)		6						Ea(mm)		0.07			
Lt(m)		210											
Fr(m)		100											
[Calcular]													

**Ilustración 4.6.** Resultados obtenidos de Uniformidad de Distribución del sistema de riego por gravedad.

#### 4.1.3. Sistema de Riego por Goteo

Al seleccionar la opción “Riego por Goteo”, la ventana nos muestra las funciones del programa para el sistema de riego por goteo las cuáles se enlistan a continuación (Ilustración 4.7).

Funciones del sistema de riego por goteo:

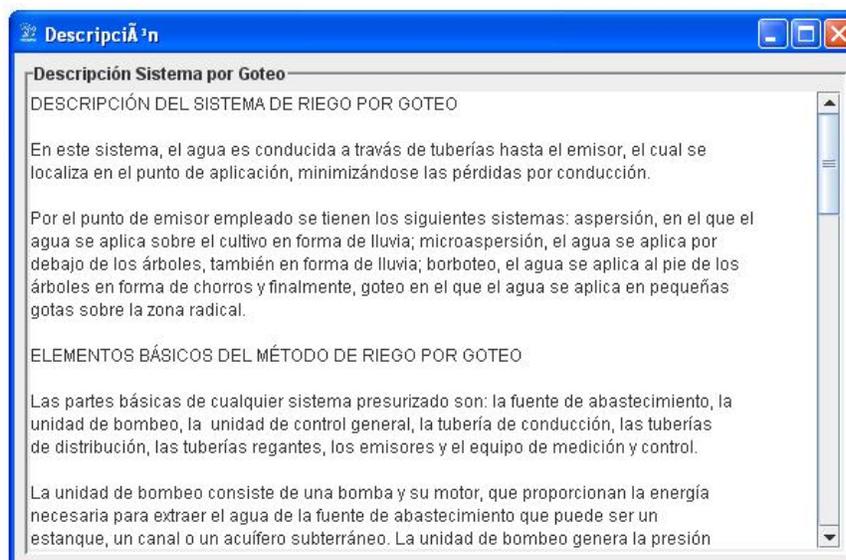
- Descripción del Sistema.
- Procedimiento de Evaluación.
- Uniformidad y Eficiencia.



**Ilustración 4.7.** Detalles de menú de Riego por Goteo.

a) Descripción del sistema

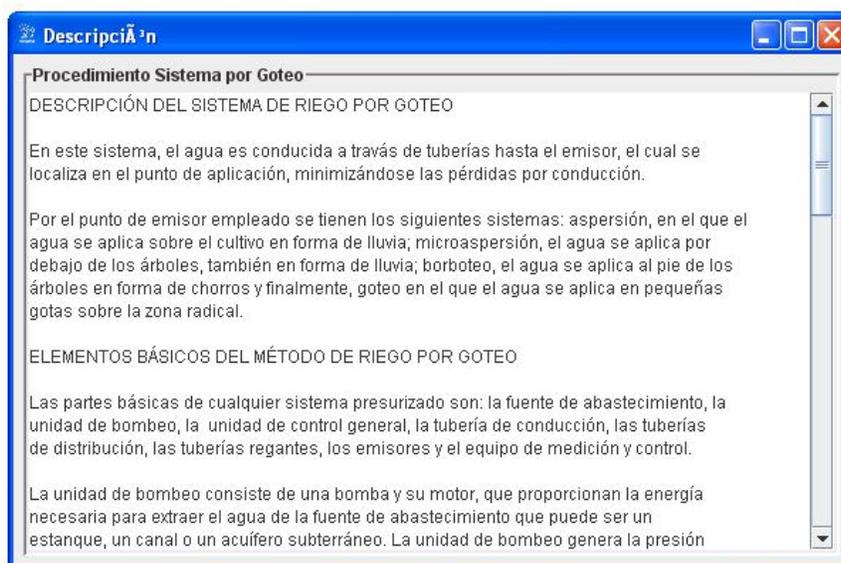
En la opción “Descripción del Sistema” nos mostrará las características del sistema de riego por goteo (Ilustración 4.8), de la cual se puede leer el contenido completo de la descripción moviendo la barra de desplazamiento vertical.



**Ilustración 4.8.** Descripción del sistema de Riego por Goteo.

## b) Procedimiento de evaluación

Al seleccionar la opción "Procedimiento de evaluación" nos dará una descripción de la evaluación del sistema de riego por goteo (Ilustración 4.9), de la cual se puede leer el contenido completo moviendo la barra de desplazamiento vertical.



**Ilustración 4.9.** Procedimiento de Evaluación del sistema de Riego por Goteo.

## c) Uniformidad y Eficiencia

En Uniformidad y Eficiencia se capturan de izquierda a derecha los siguientes datos: en la columna 1 el número de manguera, en la columna 2 la distancia en metros, en la columna 3 se ingresa el Volumen 1 ( $Vol_1$  (ml)), en la columna 4 el Volumen 2 ( $Vol_2$  (ml)) y en la columna 5 el Volumen 3 ( $Vol_3$  (ml)), estos volúmenes son captados en la evaluación para cada uno de los 16 puntos de medición. En la parte inferior izquierda se ingresa el Requerimiento de riego ( $R_r$  (mm)), Tiempo de riego ( $T_r$  (h)), Separación entre mangueras ( $S_m$  (m)), Separación entre emisores ( $S_e$  (m)) y Diámetro de mojado del emisor ( $D_e$  (m)), Ilustración 4.10.

**Riego por Goteo (Uniformidad de Distribución)**

Archivo

Nombre de Responsable: Agrícola Ventura Ángulo

Nombre de Lote: "Las 28"

Tablas

Mangu...	Distancia (m)	Vol <sub>1</sub> (ml)	Vol <sub>2</sub> (ml)	Vol <sub>3</sub> (ml)	Vol <sub>med</sub> (ml)	No.	Gasto(l/h)	$q_i - q_{med}$	$ q_i - q_{med} $
1	3	8	9	10		1			
1	50	8	9	10		2			
1	100	8	9	10		3			
1	157	8	9	10		4			
2	3	9	10	11		5			
2	50	9	10	11		6			
2	100	9	10	11		7			
2	157	9	10	11		8			
3	3	9	10	11		9			
3	50	9	10	11		10			
3	100	9	10	11		11			
3	157	9	10	11		12			
4	3	10	11	12		13			
4	50	10	11	12		14			
4	100	10	11	12		15			
4	157	10	11	12		16			

Rr(mm) 5  
Tr(h) 4  
Sm(m) 1.2  
Se(m) 0.25  
De(m) 0.5

Media(ml)  La(mm)   
 Media1/4(ml)  Ea(%)   
 U1/4(%)   
 SumAbs(ml)   
 CUC(%)

Calcular

**Ilustración 4.10.** Uniformidad de Distribución del sistema de riego por goteo.

Finalmente al dar clic en la opción “Calcular”, tomando de referencia los datos que han sido ingresados se mostrarán automáticamente los siguientes datos: en la columna 6 el volumen promedio Vol<sub>med</sub> (ml), en la columna 7 se muestra el número de volúmenes, en la columna 8 el gasto ordenado (Gasto (l/h)), y los gastos absolutos obtenidos.

En la parte inferior derecha se muestran los datos obtenidos: el gasto medio total, el gasto medio del 4º inferior (Media ¼ (ml)), el porcentaje de la Uniformidad de emisión (U 1/4 (%)), la Suma Absoluta de los volúmenes obtenidos (SumAbs (ml)), el porcentaje de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen CUC (%), Lámina aplicada (La (mm)) y el porcentaje de la Eficiencia de aplicación obtenida (Ea (%)), Ilustración 4.11.

**Riego por Goteo (Uniformidad de Distribución)**

Archivo

Nombre de Responsable: Agrícola Ventura Ángulo

Nombre de Lote: "Las 28"

Tablas

Mangu...	Distancia (m)	Vol <sub>1</sub> (ml)	Vol <sub>2</sub> (ml)	Vol <sub>3</sub> (ml)	Vol <sub>med</sub> (ml)	No.	Gasto(l/h)	$q_i - q_{med}$	$ q_i - q_{med} $
1	3	8	9	10	9.0	1	0.90	-0.100	0.100
1	50	8	9	10	9.0	2	0.90	-0.100	0.100
1	100	8	9	10	9.0	3	0.90	-0.100	0.100
1	157	8	9	10	9.0	4	0.90	-0.100	0.100
2	3	9	10	11	10.0	5	1.00	0.000	0.000
2	50	9	10	11	10.0	6	1.00	0.000	0.000
2	100	9	10	11	10.0	7	1.00	0.000	0.000
2	157	9	10	11	10.0	8	1.00	0.000	0.000
3	3	9	10	11	10.0	9	1.00	0.000	0.000
3	50	9	10	11	10.0	10	1.00	0.000	0.000
3	100	9	10	11	10.0	11	1.00	0.000	0.000
3	157	9	10	11	10.0	12	1.00	0.000	0.000
4	3	10	11	12	11.0	13	1.10	0.100	0.100
4	50	10	11	12	11.0	14	1.10	0.100	0.100
4	100	10	11	12	11.0	15	1.10	0.100	0.100
4	157	10	11	12	11.0	16	1.10	0.100	0.100

Rr(mm)	5
Tr(h)	4
Sm(m)	1.2
Se(m)	0.25
De(m)	0.5

Media(ml)	1.00	La(mm)	6.67
Media1/4(ml)	0.90	Ea(%)	75.00
U1/4(%)	90.00		
SumAbs(ml)	0.80		
CUC(%)	95.00		

Calcular

**Ilustración 4.11.** Resultados obtenidos de Uniformidad de Distribución del Sistema de Riego por Goteo.



## 5. MANUAL PARA EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PRESURIZADO DE ALTA EFICIENCIA

### 5.1. DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

#### 5.1.1. Antecedentes

A continuación se presentan antecedentes sobre eficiencias global y parciales de riego, eficiencia en riego por aspersión y uniformidad de distribución en riego por aspersión.

##### 5.1.1.1. Eficiencias global y parciales de riego

Desde la década de 1940 a 1950, se han publicado trabajos que incluyen o tratan el desempeño de los sistemas de riego y de la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

En el libro *Irrigation of Agricultural Lands* se incluyó un capítulo de mejoramiento del riego, en el que se usó el término de eficiencia de riego para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de los componentes del sistema, de acuerdo con las necesidades de la evaluación.

Tomando los conceptos básicos de ese trabajo, se presenta un análisis de los términos siguientes:

**Eficiencia global de riego ( $E_g$ ).** Es el producto de las eficiencias de los componentes individuales de un sistema de riego expresados como cocientes.

En este punto, aclaran que **los términos que definen la uniformidad y la aceptación de un riego no deberían ser etiquetados como términos de eficiencia, si el producto de todos los considerados no da la eficiencia global.** Propusieron que la eficiencia global ( $E_g$ ) debería ser el producto de las eficiencias de almacenamiento ( $E_{alm}$ ), de conducción ( $E_c$ ) y aplicación ( $E_a$ ).

**Eficiencia de almacenamiento del embalse o reservorio ( $E_{alm}$ ).** Es el cociente de dividir el volumen de agua ( $V_{ext}$ ), extraído para riego del embalse, entre el volumen para riego ( $V_{cap}$ ) que fue captado o introducido al embalse, ya sea superficial o subterráneo.

**Eficiencia de conducción ( $E_c$ ).** Es el cociente de dividir el volumen de agua entregado por un sistema de conducción abierto o cerrado a la zona de riego ( $V_{ent}$ ), entre el volumen de agua entregado ( $V_{ext}$ ) al sistema de conducción o volumen extraído.

**Eficiencia de aplicación ( $E_a$ ).** Es el cociente de dividir el volumen de agua de riego usado en evapotranspiración en un área específica de riego, más el volumen necesario para mantener un contenido favorable de sales en la solución del suelo, menos el volumen de la lluvia aprovechable en esa área de riego, entre el volumen de agua suministrado o

entregado a esa área ( $V_{ent}$ ). Para simplificar, al numerador se le llama volumen de requerimiento de riego ( $V_{rr}$ ).

Lo anterior se puede expresar de la manera siguiente:

$$E_g = E_{aim} \times E_c \times E_a = \frac{V_{ext}}{V_{cap}} \times \frac{V_{ent}}{V_{ext}} \times \frac{V_{rr}}{V_{ent}} = \frac{V_{rr}}{V_{cap}}$$

Para medir la **eficiencia global de riego ( $E_g$ )**, propusieron la fórmula siguiente:

$$E_g = \frac{(V_e + V_l - V_t) * 100}{V_{cap}}$$

$E_g$  – Eficiencia de riego (%).

$V_t$  – Volumen estimado de evapotranspiración (cm).

$V_l$  – Volumen de agua requerida para lavado de sales (cm).

$V_e$  – Volumen de agua de lluvia aprovechada o efectiva (cm).

$V_{cap}$  – Volumen que fue captado o introducido al embalse (cm).

#### 5.1.1.2. Eficiencia en riego por aspersión

El Dr. Jesús Montero, en su tesis titulada *Análisis de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersión estacionario*, con subtítulo *Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS)*, realizó una revisión de trabajos especializados relativos a eficiencias y uniformidades de aplicación del agua en riego por aspersión y, en este trabajo, se incluyen aspectos sobresalientes.

En relación con la distribución del agua en los sistemas de riego por aspersión, indica que:

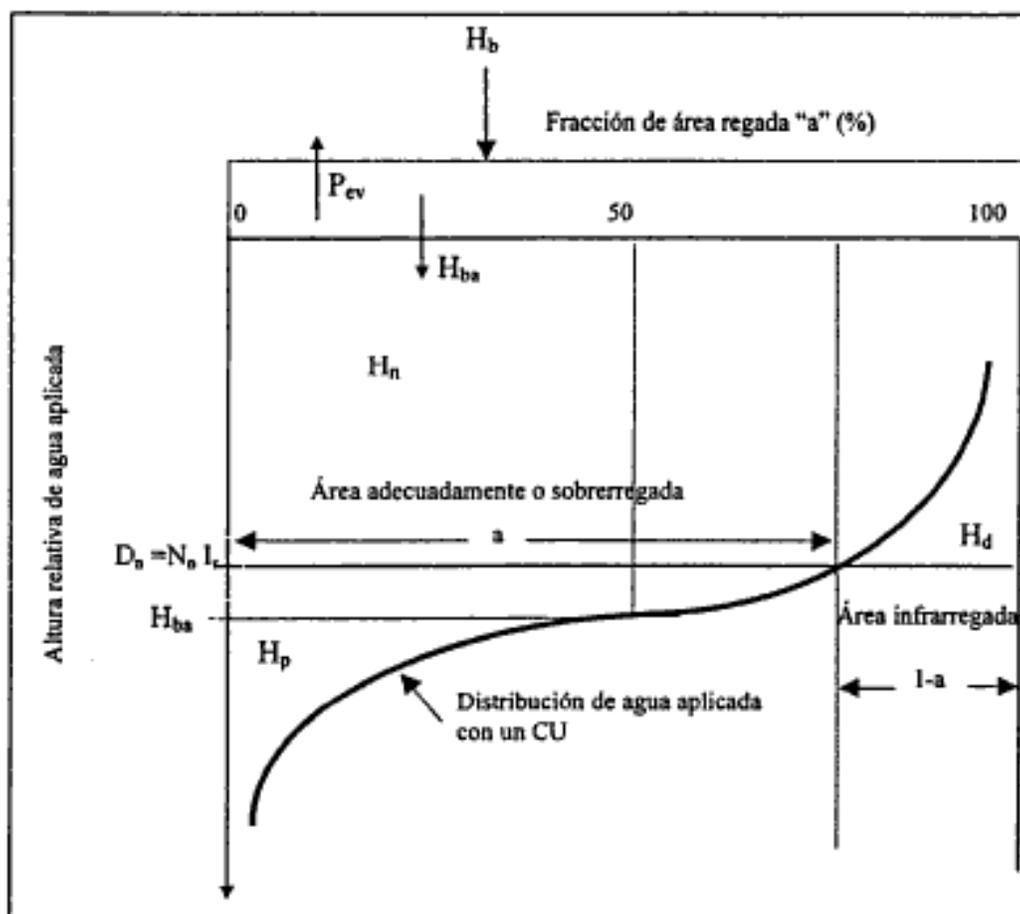
La terminología utilizada para describir el comportamiento del riego a nivel de parcela incluye normalmente los términos de eficiencia y uniformidad. Y que “lamentablemente no existe ningún parámetro que por sí solo, sea suficiente para describir el comportamiento del riego, por lo que siempre se valoran varios parámetros a la vez”.

Explica que la uniformidad del riego indica el grado de igualdad de dosis recibida por los diferentes puntos de la parcela, y que la eficiencia de riego se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado.

Sobre la uniformidad de distribución del agua (UD), indica que: se define como la relación entre alguna medida de mínima altura interceptada y la altura media interceptada (cabe

aclarar que El Dr. Montero considera altura interceptada como el agua infiltrada y el agua utilizada por la cubierta vegetal). Además, aclara que sólo debe cuantificarse el área con plantas y evitar las zonas secas entre plantas.

Presenta un diagrama típico de la distribución del agua en un riego por aspersión citando a Tarjuelo, 1995, que se presenta en la Ilustración 5.1.



**Ilustración 5.1.** Diagrama de distribución del agua en riego por aspersión presentado por Tarjuelo, 1995.

En la Ilustración 5.1. se considera que:

$H_b$  – Es la lámina bruta aplicada.

$P_{ev}$  – Son la pérdidas evitables (fugas en las conducciones, lavado de filtros y tuberías, escurrimientos, etcétera) e inevitables como la evaporación.

$H_{ba}$  – Lámina media infiltrada ( $H_{ba} = H_b - P_{ev}$ ).

a – Proporción de área que recibe al menos el agua que se quería aplicar. Y 1-a es el resto del área que queda con déficit.

$D_n$  – Lámina neta requerida o programada.

$H_n$  – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces.

$H_p$  – Lámina media percolada.

$H_d$  – Lámina media de déficit.

Bajo estas condiciones, la **calidad del riego del área bien regada o sobrerregada** puede definirse basándose en los parámetros siguientes:

**Nótese que no toma en cuenta el área mal regada o con déficit.**

Eficiencia de aplicación:

$$R_a = \frac{H_n}{H_{ba}}$$

$R_a$  – Eficiencia de aplicación en la zona bien regada (decimal).

$H_n$  – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

$H_{ba}$  – Lámina media infiltrada (cm).

**Nótese que no toma en cuenta las pérdidas por evaporación y arrastre.**

Eficiencia de distribución:

$$ED_a = \frac{D_n}{H_{ba}}$$

$ED_a$  – Eficiencia de distribución para la zona bien regada (decimal).

$D_n$  – Lámina neta requerida o programada (cm).

$H_{ba}$  – Lámina media infiltrada (cm).

Coefficiente de déficit:

$$C_d = \frac{H_d}{D_n}$$

$C_d$  – Coeficiente de déficit (decimal).

$H_d$  – Lámina media de déficit (cm).

$D_n$  – Lámina neta requerida o programada (cm).

Factor de disponibilidad:

$$F_a = \frac{H_n}{D_n}$$

$F_a$  – Factor de disponibilidad (decimal).

$H_n$  – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

$D_n$  – Lámina neta requerida o programada (cm).

Porcentaje de percolación:

$$C_p = \frac{H_p}{H_b}$$

$C_p$  – Porcentaje de percolación (decimal).

$H_p$  – Lámina media percolada (cm).

$H_b$  – Es la lámina bruta aplicada (cm).

El Dr. Montero plantea el término “Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión” ( $E_r$ ), indicando que se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado.

$$E_r = \frac{H_n}{H_b}$$

$E_r$  – Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión (decimal).

$H_n$  – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

$H_b$  – Es la lámina bruta aplicada (cm).

“Para calcular la relación entre dosis neta ( $D_n$ ) y dosis bruta ( $D_b$ ) en riego por aspersión, la eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) debe incluir los efectos de las pérdidas debidas a: falta de uniformidad en la aplicación, la percolación profunda, la evaporación, el arrastre por el viento y las fugas en las tuberías” (Keller y Bliesner, 1990), resultando:

$$D_b = \frac{D_n}{E_a}$$

$D_b$  – Dosis bruta (cm).

$D_n$  – Dosis neta (cm).

$E_a$  – Eficiencia de aplicación (decimal).

Esta fórmula aplica cuando la fracción de lavado es menor a 0.1, y cuando es mayor a 0.1, aplica la fórmula siguiente.

$$D_b = \frac{0.9 * D_n}{E_a * (1 - FL)}$$

FL – Fracción de lavado.

El coeficiente 0.9 se incluye para tener en cuenta las pérdidas inevitables por percolación al considerarse que satisfacen el 10% de las necesidades de lavado.

La fracción de lavado se puede definir como:

$$FL = \frac{R}{D_{\text{w}} + R}$$

R – Lámina de lavado.

Para el diseño de un sistema de aspersion, la  $E_a$  para un determinado porcentaje “a” de área adecuadamente regada puede calcularse como (Keller y Bliesner, 1990):

$$E_a = ED_a * P_e * P_f$$

$P_e$  – Proporción efectiva de agua que llega al suelo (decimal).

$P_f$  – Proporción de pérdidas de agua por fugas en las conducciones (decimal).

Proporción efectiva de agua que llega al suelo ( $P_e$ ). El agua que se asperja puede evaporarse, ser arrastrada por el viento y precipitarse en la zona de riego.

Pérdidas por fugas en las conducciones ( $P_f$ ). En sistemas con adecuado mantenimiento, estas pérdidas pueden ser menores del 1% del caudal transportado; en sistemas con mantenimiento deficiente las pérdidas pueden superar el 10%. (Tarjuelo, 1995).

Para tener en cuenta la falta de uniformidad y las pérdidas por percolación profunda, se define eficiencia de distribución de agua ( $ED_a$ ) para un cierto porcentaje de área “a” adecuadamente regada como:

$$ED_a = \frac{\text{altura neta mínima recibida por la fracción "a" del área regada}}{\text{Altura media recibida por el área regada}} * 100$$

Admitiendo que los datos para obtener el CU siguen una función de distribución normal, se presenta en el cuadro 5.1. (Keller y Bliesner, 1990) la relación entre los tres parámetros siguientes: uniformidad de aplicación (CU), área adecuadamente regada (a) y eficiencia de distribución del agua ( $E_{da}$ ).

**Cuadro 5.1.** Valores de la ED para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada (Keller y Bliesner (1990)).

CU (%)	% de área adecuadamente regada (a)									
	95	90	85	80	75	70	65	60	50	
	ED <sub>a</sub> (%)									
94	88	90	92	94	95	96	97	98	100	
92	83	87	90	92	93	95	96	97	100	
90	79	84	87	89	92	93	95	97	100	
88	75	81	84	87	90	92	94	96	100	
86	71	77	82	85	88	91	93	96	100	
84	67	74	79	83	86	89	92	95	100	
82	63	71	77	81	85	88	91	94	100	
80	59	68	74	79	83	87	90	94	100	
78	55	65	71	77	81	86	89	93	100	
76	50	61	69	75	80	84	88	92	100	
74	46	58	66	73	78	83	87	92	100	
72	42	55	64	70	76	82	86	91	100	
70	38	52	61	68	75	80	85	90	100	
68	34	49	58	66	73	79	85	90	100	
66	30	45	56	64	71	78	84	89	100	

La eficiencia de distribución de agua en función de “a”, puede calcularse con la ecuación (Allen, 1987):

$$ED_a = 100 + (606 - 24.9a + 0.349a^2 - 0.00186a^3) \left(1 - \frac{CU}{100}\right)$$

### 5.1.1.3. Uniformidad de distribución en riego por aspersión

Clemmens y Solomon presentan en el artículo “Estimación de la uniformidad de distribución del riego global”, los aspectos siguientes sobre la uniformidad de distribución global de riego.

Para la mayoría de los sistemas de riego, el método más práctico para determinar la uniformidad de distribución global es medir la uniformidad resultante de varias componentes y combinarlas estadísticamente.

Uniformidad de distribución del cuarto bajo. Para propósitos agrícolas se presentó la fórmula siguiente:

$$DU_{1q} = \frac{\text{promedio del 25\% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos}}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Donde el promedio del cuarto bajo es la lámina promedio en un cuarto del área de elementos con las láminas más pequeñas. Esta definición da una ponderación si los elementos de área son de tamaños diferentes.

También anotaron que para riego por aspersión se ha usado el coeficiente de uniformidad de Christiansen, el cual representa la mitad de los valores menores, si la distribución es simétrica.

$$DU_{iq} = \frac{\text{promedio del 50 \% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos}}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Las uniformidades de distribución han sido tradicionalmente combinadas multiplicando las uniformidades de distribución de los componentes individuales (Burt et ál.1992).

$$DU_{a0} = DU_{a1} * DU_{a2}$$

Donde  $DU_{a0}$  es la uniformidad de distribución global y las otras  $DU_{a1}$  y  $DU_{a2}$  son las componentes 1 y 2.

Por otra parte, presentaron la uniformidad de distribución estadística (SDU) de la siguiente manera:

$$SDU_a = 1 - K_a * CV$$

Donde el subíndice (a) es la fracción de la población de elementos (o la fracción de las áreas elementales) considerados (por ejemplo el cuarto bajo);  $K_a$  es un coeficiente que depende de la distribución estadística y de la fracción de área y CV es el coeficiente de variación (desviación estándar entre la media). Para una distribución normal  $K_{iq} = 1.27$ , para distribución uniforme  $K_{iq} = 1.30$ , para distribución parabólica  $K_{iq} = 1.68$  (Solomon, 1983).

Indicaron que en sistemas de riego portátiles manuales, semifijos y fijos, un problema común en la evaluación es que existe una componente de la uniformidad que depende del gasto de los aspersores, basado en medidas (o en modelos) de presiones o gastos de los aspersores a lo largo del campo, y otra componente de la uniformidad es el del patrón de lluvia en la aspersión. También explican que esas componentes pueden ser no independientes, porque al cambiar la descarga de un aspersor hay cambios en la lluvia captada en los recipientes y cambia la uniformidad de la lluvia captada.

Una recomendación para evaluar riego por aspersión de los tipos antes anotados, donde las diferencias de presiones entre secciones no sean grandes, es usar la ecuación siguiente:

$$SDU_{a2} = 1 - \sqrt{\left[\left(\frac{K_{a2} * m_1 * m_2}{K_{a2} * m_0}\right)^2 (1 - DU_{a2})^2 + \left(\frac{K_{a2} * m_1 * m_2}{K_{a2} * m_0}\right)^2 (1 - DU_{a2})^2 + \left(\frac{K_{a2} * m_1 * m_2}{K_{a2} * K_{a2} * m_0}\right)^2 (1 - DU_{a2})^2 * (1 - DU_{a2})^2\right]}$$

*SDU* – Uniformidad de distribución estadística del sistema (con dos secciones evaluadas).  
*K<sub>ao</sub>, K<sub>a1</sub>, K<sub>a2</sub>* – Coeficiente que depende de la distribución de la población y de la fracción del área de la media baja, para la población y para las dos secciones de riego.  
*m<sub>0</sub>, m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>* – medias de los datos de lluvia de la población y de las dos secciones.  
*DU<sub>a1</sub>, DU<sub>a2</sub>* – Uniformidad de la lluvia en cada sección.

Mario Montiel (2010) redactó sobre la uniformidad de distribución, que se obtiene a partir de los datos de campo resultantes de la evaluación y que es un indicador de la distribución de la lámina infiltrada. Se expresa en % y se refiere a la uniformidad basada en el cuarto bajo.

Uniformidad de distribución del cuarto bajo.

$$DU_{1q} = \frac{\text{promedio del 25\% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos} * 100}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Indica que Keller (1990), citado por Tarjuelo (1999), define la uniformidad de distribución de una sección de la siguiente manera:

$$UD_s = UD * \frac{1}{4} * \left[ 1 + 3 \left( \frac{P_n}{P_a} \right)^{0.5} \right]$$

*UD<sub>s</sub>* – Uniformidad de distribución de la sección.

*UD* – Uniformidad de distribución de la lluvia con el cuarto bajo.

*P<sub>n</sub>* – Presión mínima de un aspersor de la sección.

*P<sub>a</sub>* – Presión media de los aspersores en la sección de riego.

En esta fórmula se integran los dos componentes que influyen en la uniformidad del riego; sin embargo, no se indica nada sobre límites para calificación ni para la mejora de los sistemas de riego. La ventaja de esta fórmula, es que en lugar de diferencias de descargas de los emisores, propone usar diferencias de presiones, que se pueden obtener con manómetros con tubos de Pitot, de manera muy práctica.

### 5.1.2. Método propuesto para calcular la eficiencia global de sistemas de riego por aspersión

#### 5.1.2.1. Eficiencia, uniformidad y pérdidas de agua en el sistema de riego

En los antecedentes, se observa que los procedimientos y parámetros que se desarrollaron con el objetivo de aplicar las herramientas estadísticas para evaluar el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se enfocaron a dar resultados numéricos tendientes a representar globalmente la uniformidad de distribución de las láminas aplicadas en el sistema de riego y no a indicadores que permitan dar recomendaciones directas para mejorar la operación o el sistema de riego.

Esto parece indicar que los procedimientos y parámetros de los investigadores se fueron alejando de los objetivos de los agricultores y de sus indicadores, para mejorar el uso del agua de riego e incrementar la productividad de los cultivos.

Tomando en cuenta los antecedentes, se desarrolló un método que integró los parámetros indicadores del buen funcionamiento de los sistemas de riego por aspersión, incluyendo el uso y manejo del agua desde la fuente de abastecimiento hasta las plantas de la zona de cultivo.

Esto se logró incluyendo las eficiencias de almacenamiento, conducción y aplicación del agua en los sistemas de riego por aspersión y se resalta que se incluyó un análisis de las pérdidas de agua durante el proceso de almacenamiento, conducción y aplicación del agua, que permitió enfocar de manera diferente los conceptos de uniformidad de lluvia de los aspersores y la uniformidad de distribución hidráulica para incluirlos como pérdidas de agua debidas a la falta de uniformidad de riego.

#### 5.1.2.2. Evaluaciones agronómica e hidráulica

Los sistemas de riego deberían evaluarse desde el punto de vista de agricultura sustentable, del funcionamiento hidráulico y desde el enfoque económico.

La evaluación del sistema de riego por aspersión (agronómica e hidráulica) incluye aspectos sobre el desempeño del sistema de riego, la productividad del agua y la eficiencia global del sistema, sus eficiencias parciales y las pérdidas de agua en las diferentes fases del proceso de riego.

El estudio del desempeño de los sistemas de riego incluye los temas de: evaluación con presiones y gastos del sistema de riego, evaluación de la uniformidad hidráulica del sistema y evaluación de la uniformidad de la lluvia generada por los aspersores.

Los indicadores de desempeño deben señalar las acciones a desarrollarse para mejorar el sistema de riego o su operación, para sostener o incrementar la producción de los cultivos.

### 5.1.2.3. Evaluación económica

La evaluación económica del sistema de riego incluye los aspectos de los costos del sistema de riego y su vida útil, los aspectos de costos de los cultivos y de su productividad, para llegar a la relación beneficio-costos del sistema de riego.

### 5.1.2.4. Conocimientos necesarios para la evaluación de los sistemas de riego por aspersión

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se requiere conocer las partes fundamentales que los integran y los tipos de sistemas que se utilizan en la agricultura.

Por otra parte, con la finalidad de evaluar agrónomicamente los sistemas de riego por aspersión es necesario conocer conceptos sobre: las relaciones entre agua, suelo, planta y el riego por aspersión; láminas de riego; aspectos de salinidad relacionados con el riego por aspersión y requerimientos de riego de los cultivos.

Para evaluar hidráulicamente sistemas de riego por aspersión es necesario conocer conceptos básicos de estadística y los parámetros básicos para caracterizar muestras o poblaciones, como medidas de tendencia central y dispersión y distribuciones de frecuencias, así como los aspectos fundamentales del funcionamiento de los aspersores y de las tuberías regantes.

Por último, para la evaluación económica se requiere conocer el inventario de un sistema de riego y la vida útil de los componentes, el costo por partes y global, los costos de operación, los costos de cultivo, la producción y el precio de venta del producto.

Los aspectos señalados en los párrafos anteriores se tratan en los capítulos 2, 3, 4 y 5, y el procedimiento propuesto de evaluación del desempeño de los sistemas de riego por aspersión se trata detalladamente en el capítulo 6.

## **5.2. CONCEPTOS AGRONÓMICOS DE RIEGO POR ASPERSIÓN**

En este capítulo se presentan conceptos sobre: relaciones agua-suelo-riego por aspersión, como son: almacenamiento del agua en el suelo, disponibilidad del agua para las plantas, movimiento del agua en el suelo, láminas de riego, salinidad en riego por aspersión y requerimiento de riego.

### *5.2.1. Relaciones agua-suelo-riego por aspersión*

#### 5.2.1.1. Almacenamiento de agua en el suelo

Para obtener buenas cosechas con riego por aspersión, se necesita saber cuánta agua debe suministrarse al cultivo.

Para conocer cuánta agua se requiere aplicar en un riego por aspersión, es necesario conocer la cantidad de agua que pueden almacenar los suelos y la humedad que contienen antes del riego, para aplicar la faltante para llenar el almacén considerado. También, indirectamente, se puede conocer la cantidad de agua que consumió el cultivo en el periodo de tiempo transcurrido desde el riego anterior y, además en los dos casos, la cantidad de agua que se pierde por evaporación y arrastre durante la aspersión del agua de riego.

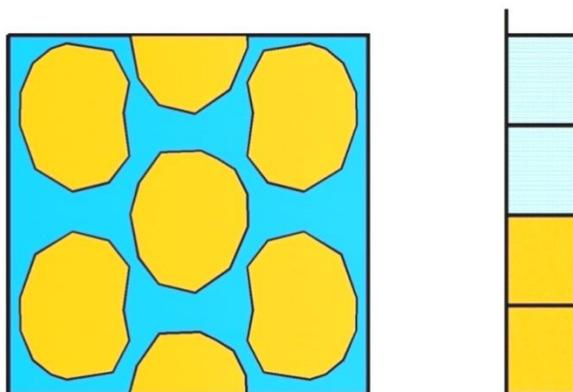
Los suelos contienen partículas sólidas y poros. Los sólidos son minerales y materia orgánica y los poros pueden estar ocupados por agua, aire o una combinación de agua y aire.

Los parámetros de contenidos de humedad del suelo relacionados con riego son: suelo saturado, suelo a capacidad de campo, suelo a porcentaje de marchitamiento permanente y seco.

#### 5.2.1.1.1. Suelo saturado

Un suelo agrícola que tiene todos los poros llenos de agua está saturado (SS). En la práctica se dice que los suelos en campo no llegan a saturarse completamente porque queda aire atrapado en poros muy pequeños, entonces quedan casi saturados, pero aun así se les llamará "saturados". La capa superficial de los suelos se puede saturar después de una lluvia fuerte que produzca encharcamientos o inmediatamente después del riego en surcos y melgas, donde se presente inundación parcial o total. En estas condiciones se genera una saturación temporal del suelo en la superficie encharcada. También en las

zonas que tienen mantos freáticos, por debajo del nivel libre del agua o nivel estático, se dice que se encuentra saturado el suelo.



**Ilustración 5.2.** Suelo saturado.

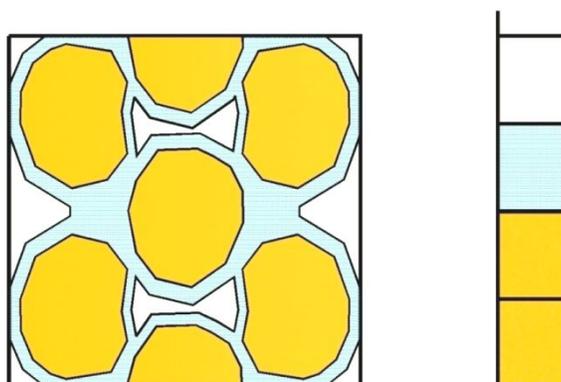
Los cultivos pueden afectarse severamente si se presentan condiciones de saturación en el suelo por periodos de tiempo grandes, y pueden reducir su producción si los periodos de saturación son menores; esto, dependiendo de su resistencia a la inundación.

Debido a que en riego por aspersión se produce artificialmente la lluvia, es fundamental que la intensidad de la lluvia generada sea menor que la capacidad de absorción del agua o que la velocidad de infiltración del agua en el suelo, con la finalidad de evitar la saturación de la capa superficial y aprovechar al máximo el potencial de crecimiento y de producción del cultivo.

Por ejemplo, si un cultivo de alfalfa cultivado en melgas es regado por inundación después del corte, la inundación temporal y su efecto de saturación retrasan su crecimiento en comparación con el mismo cultivo regado por aspersión, sin saturación del suelo.

#### 5.2.1.1.2. Suelo a capacidad de campo

Un suelo con buen drenaje interno, después de un riego pesado o de una lluvia intensa y de gran magnitud, se satura temporalmente en su capa superficial y al pasar el tiempo (cuatro horas en arenas y hasta más de 72 horas en suelos arcillosos), se drena por acción de la gravedad. Cuando deja de drenar, queda con un contenido de humedad en los poros capilares retenido contra la acción de la gravedad. A este contenido de humedad en el suelo se le llama capacidad de campo (CC). Para fines de estandarización, se ha considerado que la fuerza de retención del agua a capacidad de campo corresponde a 0.3 atmósferas de tensión.



**Ilustración 5.3.** Suelo con contenido de humedad a capacidad de campo.

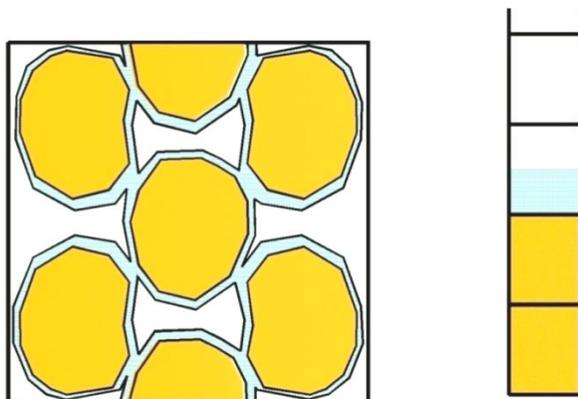
Cuando se riega un cultivo por aspersión, un objetivo es que se aplique la cantidad de agua necesaria para que el suelo quede a capacidad de campo en el espesor de la mayor actividad de las raíces; sin embargo, para lograr esto, generalmente es necesario aplicar un volumen excedente de agua para compensar las pérdidas que se presentan por la evaporación y arrastre del agua en la trayectoria que sigue desde el aspersor hasta el suelo, la falta de uniformidad en el riego, y también cuando hay necesidad de aplicar agua en exceso para controlar las sales solubles del suelo.

#### 5.2.1.1.3. Suelo a marchitamiento permanente

Los cultivos consumen agua del suelo. Una parte se evapora de la superficie y otra es extraída del suelo por las raíces de las plantas; conforme la consumen, disminuyen el contenido de humedad del suelo en la zona de las raíces y también se concentra la solución del suelo. Al reducirse el contenido de humedad y concentrarse la solución del suelo, el agua es retenida con mayor fuerza por la acción de fuerzas capilares que actúan en los poros que forman las partículas del suelo y también actúa mayor presión osmótica. El proceso sigue hasta un nivel en el que las plantas no pueden absorber fácilmente. En estas condiciones, las plantas empiezan a realizar un esfuerzo grande para extraer el agua, hasta que absorben menos que la transpirada y sus células empiezan a perder turgencia o, en términos prácticos, a secarse.

Cuando la planta presenta marchitez, si se le agrega agua y se recupera, la marchitez fue temporal; si no se recupera la marchitez es permanente. En estas condiciones, en el suelo aún queda agua retenida con gran fuerza (15 atmósferas). A ese contenido de agua del suelo se le llama “contenido de humedad a marchitamiento permanente”; también se le denomina “porcentaje de humedad a marchitamiento permanente” o, para simplificar, se le llama “punto de marchitamiento permanente” (PMP).

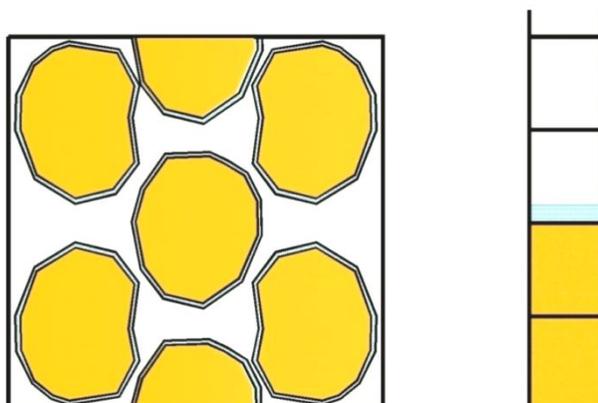
En condiciones generales, conforme las plantas realicen mayor esfuerzo para obtener el agua y los nutrientes, menor será su productividad, porque de la energía que recibe una parte es la que utiliza para la absorción de agua, otra para la nutrición, el desarrollo y la fructificación; entre más energía use en la absorción menos usará en las otras funciones y tendrá menor rendimiento.



**Ilustración 5.4.** Suelo con porcentaje de humedad a marchitamiento permanente.

Por lo anterior, no debe dejarse consumir el agua del suelo hasta el PMP. Este debe usarse para el cálculo de la lámina del primer riego, para asegurar que el suelo se humedezca bien y que las semillas puedan germinar.

El suelo puede secarse más que el nivel de humedad a marchitamiento permanente, sobre todo en los primeros centímetros de la capa superficial, quedando la poca agua adherida a la superficie de las partículas de suelo; esta es la humedad higroscópica y no es aprovechable.



**Ilustración 5.5.** Suelo con humedad higroscópica.

#### 5.2.1.1.4. Aireación dentro del suelo

Como en el riego por aspersión no se presentan o no deben presentarse condiciones de suelo saturado, las condiciones de aireación para la mayoría de los cultivos son muy favorables.

El volumen de aire y agua en el suelo (volumen total de poros) y el volumen de sólidos, dependen de los tamaños de las partículas y su distribución en el suelo. Los suelos de mayor porosidad son los arcillosos y los de menor porosidad son los arenosos. Sin embargo, en los arcillosos son poros de tamaño pequeño que dificultan el movimiento del agua y del aire a través del suelo, esto genera poca aireación y baja conductividad hidráulica. Esto es desventaja para el riego por aspersión.

Los suelos arenosos tienen un volumen pequeño de poros; no obstante, son poros de tamaño grande que facilitan el movimiento del agua y del aire a través del suelo, esto genera buena aireación y alta conductividad hidráulica que favorecen al riego por aspersión.

El volumen de aire del suelo determina la posibilidad de suministrar  $O_2$  a las raíces y el intercambio gaseoso con el medio ambiente y, adicionalmente, al presentar valores favorables se garantiza la formación de un extenso sistema radical y radicular, asociado con la absorción de nutrientes y agua.

La aireación que se genera con riego por aspersión, favorece especialmente a cultivos como la alfalfa, que se cosechan cortando las plantas y deben brotar de nuevo, porque no se inunda y no se satura el suelo, de manera que los retoños brotan más pronto que en riego superficial.

#### 5.2.1.2. Disponibilidad del agua

Para obtener buenas cosechas de los cultivos, se requiere que el agua y los nutrimentos del suelo estén en condiciones de ser fácilmente absorbidos por la raíz. De la energía total que tiene aprovechable una planta, en primer lugar usa una parte para absorber el agua y, en segundo lugar, los nutrimentos del suelo; las plantas utilizan la energía restante para desarrollar sus funciones fisiológicas, como crecer, formar sus tejidos y sus frutos.

Para que el agua sea fácilmente aprovechable en el suelo, es necesario que se reponga frecuentemente la cantidad de agua que consume el cultivo; esto genera que se apliquen riegos ligeros o de láminas pequeñas. Con el riego por aspersión ello puede realizarse con facilidad y buena eficiencia.

Con la finalidad de interpretar el grado de disponibilidad del agua en el suelo, se describen a continuación los conceptos siguientes: humedad aprovechable total y humedad fácilmente aprovechable.

#### 5.2.1.2.1. Humedad aprovechable total

Se denomina humedad aprovechable total al contenido de humedad que pueden aprovechar los cultivos, que corresponde a la humedad que almacena un suelo entre capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

En la práctica, no se puede aprovechar totalmente el agua que se almacena entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente en un suelo, porque las plantas serían afectadas por un déficit de agua que les produciría la marchitez permanente. Por lo anterior, fue necesario definir un contenido de humedad en el rango aprovechable, fácilmente extraíble, para que las plantas no se estresaran tanto al absorber el agua del suelo.

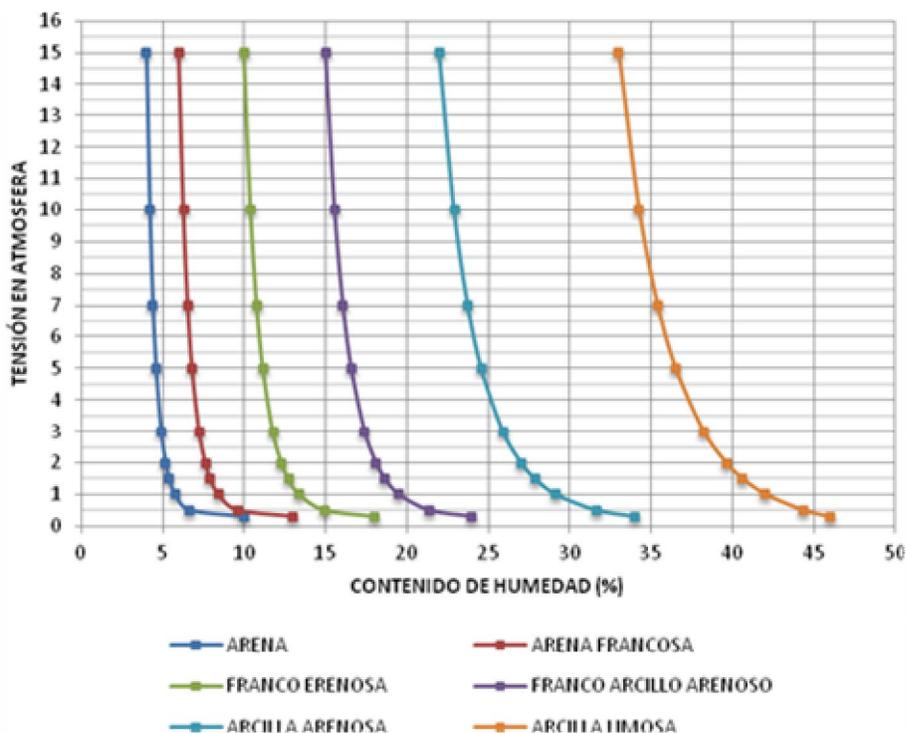
#### 5.2.1.2.2. Humedad fácilmente aprovechable

Al volumen de agua que las plantas extraen del suelo después de un riego, sin hacer un esfuerzo grande, se le llama “humedad fácilmente aprovechable”. En cultivos bajo riego, el volumen de agua o porcentaje de humedad aprovechable que se debe permitir extraer entre riegos, es la humedad fácilmente aprovechable. El porcentaje de humedad fácilmente aprovechable corresponde al factor de extracción o abatimiento del agua del suelo.

Es necesario dejar que se consuma la menor cantidad de humedad fácilmente aprovechable y reponerla al suelo para mantener los cultivos en las condiciones más favorables para su desarrollo o crecimiento; esto puede realizarse con los sistemas de riego por aspersión debido a que se pueden aplicar láminas de riego pequeñas en intervalos de tiempo cortos. Los pivotes, avances frontales y cañones son sistemas de riego que pueden aplicar láminas de riego pequeñas con intervalos cortos de tiempo.

A continuación, se presentan curvas de retención de humedad de suelos ligeros. En las ordenadas se consideró la tensión con que el suelo retiene la humedad, y en las abscisas el contenido de humedad en porcentaje de volumen de agua retenida en el suelo a la tensión correspondiente.

Si se considera que tres atmósferas es el límite máximo de tensión de la humedad en el suelo, hasta el cual las plantas extraen agua fácilmente aprovechable, se observa en la Ilustración 5.6. que la mayor parte de la humedad aprovechable se encuentra fácilmente disponible en los suelos de texturas medias a arenosas.



**Ilustración 5.6.** Curvas de retención de humedad de suelos.

### 5.2.1.3. Movimiento del agua en el suelo

En riego por aspersión es muy importante conocer cómo se mueve el agua en el suelo, desde su infiltración, su distribución en el momento del riego y su redistribución después del riego.

La textura del suelo genera propiedades relacionadas con la velocidad de infiltración del agua, con la capacidad de almacenamiento y con la aireación, por lo que la textura sirve como indicador para aceptar la adaptabilidad del riego por aspersión a los suelos.

El riego por aspersión tiene ventajas sobre otros métodos de riego en suelos con texturas desde francas hasta arenosas y en los cultivos de cobertura total.

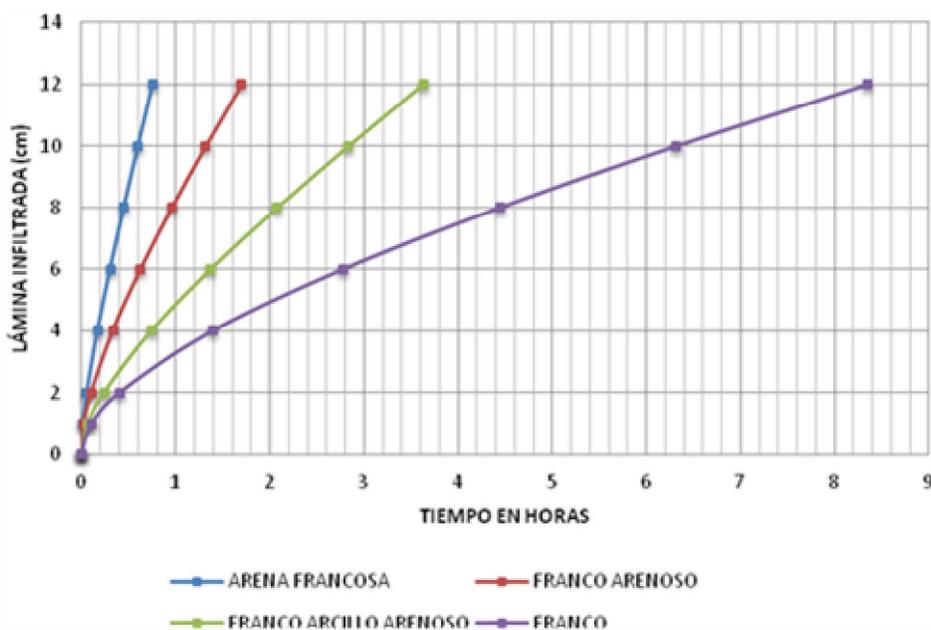
#### 5.2.1.3.1. Infiltración del agua en el suelo en riego por aspersión

El agua debe penetrar en el suelo o ser absorbida por su medio poroso sin saturar su capa superficial, porque al saturarse puede escurrir hacia otro sitio no proyectado; puede encharcar con posibilidad de perder agua por percolación. Saturar el suelo por tiempos mayores de tres días puede reducir la productividad del cultivo por falta de aireación.

Para caracterizar la infiltración del agua en el suelo se usan curvas de infiltración acumulada y de velocidad de infiltración instantánea, generadas de datos de campo.

### 5.2.1.3.2. Infiltración acumulada

A continuación, se presenta la Ilustración 5.7. con cuatro curvas de infiltración acumulada para texturas de suelo ligeras o de tendencia arenosas. Se observa que en la textura arenosa se pueden infiltrar 12 cm de lámina en 45 minutos, en la franco arenosa se infiltran en una hora y 44 minutos, en la franco arcillo arenosa se infiltran en un poco menos de cuatro horas y, por último, en el caso de suelo franco, deben emplearse un poco más de ocho horas para que se infiltren los 12 cm de lámina de riego.

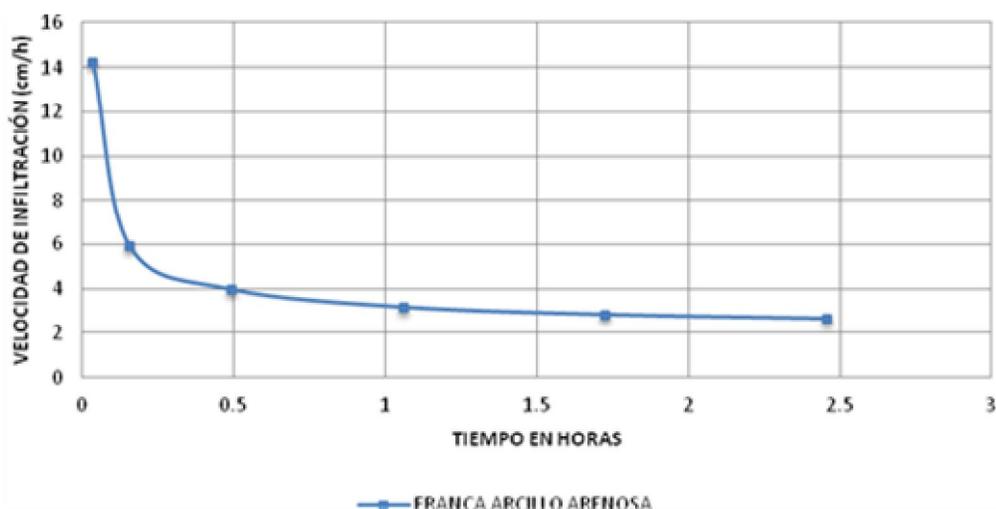


**Ilustración 5.7.** Curvas de infiltración acumulada del agua en suelos ligeros.

Las curvas de láminas infiltradas acumuladas en el tiempo sirven para determinar gráficamente los tiempos de riego del sistema de aspersión para aplicar láminas de riego específicas. Debe tomarse en cuenta que la lluvia no debe generar escurrimiento del agua o encharcamiento.

### 5.2.1.3.3. Velocidad de infiltración

El éxito del riego por aspersión depende, en primer lugar, de que la velocidad potencial de infiltración del agua en el suelo sea mayor que la intensidad de precipitación para que no existan escurrimientos, encharcamientos, ni suelo saturado y, en segundo lugar, depende de que se apliquen las cantidades requeridas de agua. Generalmente, en riego por aspersión estándar el agua cae al suelo en forma de lluvia, de manera intermitente y varía la superficie mojada en cada movimiento del aspersor; sin embargo, en el suelo, mediante la capilaridad se distribuye la humedad en el área dominada por la lluvia del aspersor, mejorando la uniformidad de humedecimiento del suelo.



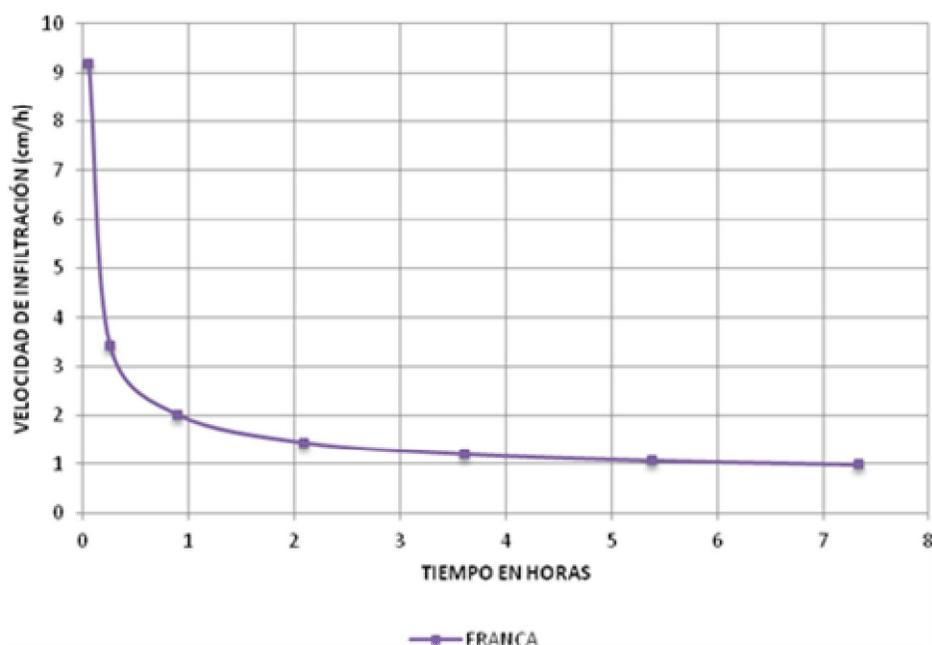
**Ilustración 5.8.** Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco arcillo arenoso.

Si se aplica el riego por aspersión con precipitación promedio de 2 cm/h, en tres horas el sistema de riego aporta una lámina de 6 cm. En la Ilustración 5.8. se observa que el área bajo la curva entre dos límites de tiempo es la lámina total que el suelo absorbe en el tiempo fijado por los límites. Si se aplicara una intensidad de precipitación de 4 cm/h, se observa en la gráfica que después de media hora el agua empezaría a escurrir o encharcar.

Los suelos limosos y francos, de textura media, tienen la mayor parte de las partículas de tamaño intermedio y son suelos fáciles de manejar; retienen suficiente agua y tienen velocidades de infiltración medias. Estos suelos, en general, se pueden regar muy bien con los sistemas de riego por aspersión, seleccionada correctamente la intensidad de lluvia necesaria.

Por último, los suelos arenosos contienen la mayor parte de las partículas sólidas de tamaño grande que retienen poca agua, por lo que requieren de riegos frecuentes;

además tienen altas velocidades de infiltración del agua. Por estas características, son los suelos que presentan mayor ventaja para usar riego por aspersión, sobre todo en los cultivos de cobertura total. En estos suelos, la mayor parte del agua disponible es fácilmente aprovechada por los cultivos; sin embargo, si se deja bajar el contenido de humedad cerca del PMP, el cambio de esfuerzo que las plantas deben hacer para extraerla del suelo es muy grande y pueden tener marchitez temporal extrema.



**Ilustración 5.9.** Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco.

En la figura 5.9. se observa que debería utilizarse una precipitación efectiva de 1 cm/h para evitar que ésta supere a la velocidad de infiltración del agua en el suelo. También se observa que aproximadamente en siete horas se aplica una lámina de 7 cm sin encharcar, puesto que toda el agua que precipita efectivamente se infiltra. En este suelo, si se aplica una intensidad de precipitación de 2 cm/h, prácticamente a la hora de riego el agua empieza a escurrir o encharcar.

La intensidad de aplicación se calcula tomando en cuenta el gasto emitido por el aspersor y el área de cobertura de la lluvia, de manera que la intensidad de la lluvia real es menor que la calculada debido a la que se evapora y es arrastrada por el viento; esto sirve como factor de seguridad para no exceder la capacidad de infiltración del agua en el suelo.

#### 5.2.1.4. Lámina de riego en aspersión

En la producción de los cultivos con los sistemas de riego, se acostumbra manejar láminas de riego en lugar de volúmenes de agua debido a la facilidad de hacer operaciones y facilitar comparaciones de cantidades de agua aplicadas a parcelas con superficies diferentes.

##### 5.2.1.4.1. Lámina de agua

En riego por aspersión se aplica agua en riegos de presiembra o de siembra con suelo sin cubierta vegetal, que pueden compactarse o erosionarse si no se aplica el tamaño de gota e intensidad de lluvia adecuados y riegos de auxilio para reponer la consumida. Después del primer riego, los cultivos consumen el agua del suelo y debe reponerse el volumen consumido para restablecer el nivel de humedad aprovechable en el suelo a capacidad de campo.

Para saber cuál es la cantidad de agua que debe aplicarse durante el riego de un cultivo, con un sistema de aspersión, es necesario considerar cuánta agua puede almacenar el suelo y cuánta le falta para llenar el almacén aprovechable; además, se requiere tomar en cuenta las pérdidas por arrastre y evaporación, y también la lámina de agua percolada. No deben planearse pérdidas por escurrimiento.

Para medir las cantidades de agua que deben proyectarse o reponerse en el riego se utiliza el concepto de “lámina de agua” y corresponde a la altura teórica que alcanza un volumen de agua sobre una superficie plana a nivel y unitaria. Por ejemplo, 100 litros de agua se vierten sobre una superficie plana de un metro cuadrado, luego la altura que alcanzaría el agua sería de 0,10 m, 10 cm o 100 mm; esto significa que un litro de agua por metro cuadrado equivale a un milímetro de lámina.

$$LR = \frac{100 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} = \frac{100 * 10 * 10 * 10 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^2} = 10 \text{ cm} = 100 \text{ mm}$$

##### 5.2.1.4.2. Lámina de agua aprovechable en los suelos

La lámina de agua aprovechable corresponde a la diferencia de las láminas que representan a capacidad de campo y el porcentaje de humedad a marchitamiento permanente.

De acuerdo con su textura, los suelos tienen diferentes contenidos de humedad aprovechable. En el cuadro 5.2. se presenta la lámina de agua aprovechable que corresponde a cada textura, en centímetros por metro de espesor del suelo.

**Cuadro 5.2.** Almacenamiento de agua aprovechable en suelos.

TEXTURA	LÁMINA APROVECHABLE cm/m
Arcilla	13
Arcilla limosa	15
Arcilla arenosa	11
Franco arcillo limosa	16
Franco arcillosa	16
Franco arcillo arenosa	08
Franca	11
Franco limosa	16
Limo	19
Franco arenosa	09
Arena francosa	06
Arena	05

#### 5.2.1.4.3. Láminas de riego neta y bruta

La lámina de riego neta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para satisfacer el requerimiento de riego del cultivo, y la lámina de riego bruta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para almacenar, conducir y aplicar el agua al nivel de parcela. Esta cantidad incluye la lámina de evapotranspiración del cultivo, la lámina de control de sales y las láminas correspondientes a las pérdidas de arrastre y evaporación, percolación, conducción, almacenamiento y escurrimiento; también toma en cuenta las aportaciones de lluvia, manto freático y rocío.

Es importante aclarar que no debe aceptarse que se proyecte aplicar láminas de riego que originen déficit de lámina en alguna parte de la parcela. Esto se debe a que hay técnicos que consideran aplicar la lámina media de los aspersores como la lámina neta y, por lo tanto, aplican una lámina que compensa los déficits en la mayoría de los aspersores, con los excesos que aplica una minoría de los mismos. No toman en cuenta que, generalmente, la distribución de la emisión hidráulica no corresponde a una distribución normal.

La lámina de riego neta se calcula con la fórmula siguiente:

$$LR_n = (CC - CHA) * ES$$

$LR_n$  – Lámina de riego neta (cm).

$CC$  – Contenido de humedad a capacidad de campo relativo a volumen (decimal).

$CHA$  – Contenido de humedad actual del suelo en el espesor considerado (decimal).

$ES$  – Espesor de suelo que se requiere humedecer (cm).

La lámina de riego bruta en los sistemas de riego que no tienen obra de almacenamiento, se calcula con la fórmula siguiente:

$$LR_b = \frac{LR_n}{E_c * E_a}$$

$LR_b$  – Lámina de riego bruta (cm).

$LR_n$  – Lámina de riego neta medida o de proyecto (cm).

$E_c$  – Eficiencia de conducción determinada en operación el sistema de riego (decimal).

$E_a$  – Eficiencia de aplicación determinada en campo (decimal).

En el riego por aspersión no debe olvidarse incluir las pérdidas de agua por arrastre y evaporación, que se presentan en la lluvia que genera el aspensor.

Para calcular cuánta agua aplicar en tiempo real en riego por aspersión (fija, portátil manual y mecanizada), es necesario conocer cuánta agua le falta al suelo para llenarlo hasta capacidad de campo y tomar en cuenta las eficiencias de aplicación y de conducción.

Para calcular láminas en proyectos se puede usar el procedimiento de cálculo siguiente: a) se define la textura del suelo o se considera la textura al tacto; b) se obtiene la lámina aprovechable por metro de espesor de suelo del cuadro 5.2.; c) esta lámina se multiplica por el espesor de suelo considerado por humedecer, obteniéndose la lámina total aprovechable y d) cuando se riega para sembrar en húmedo o se siembra en seco y se riega, se considera que es el primer riego del ciclo de cultivo y se aplica la lámina correspondiente a toda la humedad aprovechable; cuando es riego de reposición de humedad consumida por el cultivo se considera riego de auxilio, se selecciona el factor de abatimiento o porcentaje de agua que se consume de la aprovechable y se calcula la lámina neta de riego por reponer; si no se tiene información, se puede usar el 50 % de la aprovechable.

#### 5.2.1.5. Aspersión y salinidad

Para hacer un buen uso del riego por aspersión, se necesita tomar en cuenta la composición química del agua, la cantidad de sales en solución, las condiciones de salinidad en el suelo y la textura del mismo.

Los aspectos principales de regar con aguas salinas son los siguientes:

**Toxicidad y deshidratación en las plantas.** El problema principal de regar cultivos por aspersión con aguas salinas es que el follaje de los cultivos puede afectarse por la presión osmótica del agua o por su toxicidad. Las yemas, flores y frutos se afectan por iones tóxicos o por las sales solubles. La presencia de iones como cloruros, sodio y boro pueden provocar toxicidad debido a la acumulación que se produce en semillas, tallos y hojas.

Además, cuando la concentración de sales solubles es alta y la presión osmótica del agua supera la presión osmótica de las células, al entrar en contacto con yemas, flores y hojas, les quita agua y produce deshidratación directa o pérdida de turgencia. En el caso de las yemas y de las flores es más fuerte el efecto.

La absorción de agua en el follaje y su toxicidad en las plantas ocurren durante periodos de tiempo con humedad relativa menor de 35%, con altas temperaturas y presencia de viento. Los cultivos sensibles al cloro y al sodio son los que se pueden afectar más fácilmente. Para reducir los efectos de toxicidad en las hojas por la aspersión, se recomienda regar de noche, y evitar el riego durante la presencia de vientos secos y cálidos. Además, los movimientos de tuberías con aspersores deben hacerse en la dirección más apegada a la del viento para que lave las hojas mojadas por transporte de gotas de la posición anterior. También, usar aspersores de giro rápido, aplicar intensidades altas de lluvia sin encharcar y riego con gotas grandes sin que originen problemas de escurrimiento por compactación del suelo.

**Sodicidad del suelo.** La existencia de ion sodio y su acumulación en el suelo origina problemas de pérdida de estructura en suelos de textura franca a arcillosa, reduciendo su permeabilidad, por lo que en esos suelos no se puede utilizar el riego por aspersión. Los suelos de textura desde franca hasta arenosa son indicados para regar con aspersión. Donde la capacidad de intercambio químico es media o pequeña, no se puede adsorber el sodio fácilmente y se lavan las sales con láminas de agua de riego en exceso.

**Control de humedad del suelo.** En general, para lograr altos rendimientos en suelos ligeramente salinos, se necesita que la capa superficial, donde se encuentran las raíces de las plantas, se mantenga a un nivel de humedad fácilmente aprovechable y así evitar altos esfuerzos de humedad en el suelo debidos a efectos de presión osmótica que reduzcan la absorción del agua por las plantas. Esto se facilita si el riego se realiza con los sistemas de riego por aspersión.

Cuando la precipitación pluvial no llega a transportar las sales a mayor profundidad que la zona de las raíces, es recomendable aplicar agua adicional de riego o de sobrerriego para hacer el lavado o control de las sales acumuladas en la zona radical. Puede hacerse con láminas de lavado por riego o por ciclo de cultivo.

Para tomar en cuenta la calidad del agua y el criterio de salinidad, se debe calcular el exceso de agua de riego necesaria para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo, con la finalidad de evitar la reducción de la producción del cultivo por los efectos de salinidad. Este exceso debe agregarse al requerimiento de riego.

También se requiere conocer la calidad del agua de riego y el contenido de sales solubles para determinar las condiciones en las que se puede trabajar con buena productividad y, por lo tanto, deben conocerse el factor de lavado y la lámina de sobrerriego, que debe adicionarse al requerimiento de riego.

Se encontró una relación entre la productividad de un cultivo y la salinidad en el extracto de la solución del suelo, que se representó con la ecuación siguiente:

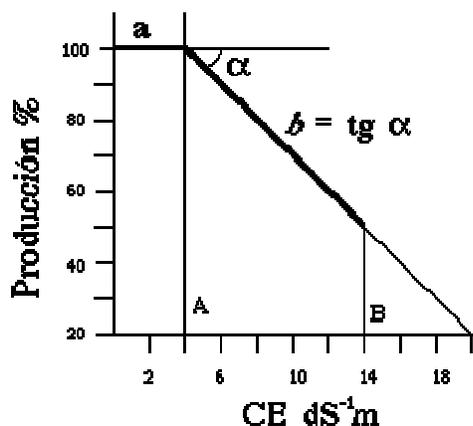
$$PC_s = 100 - b * (CE_{es} - a)$$

$PC_s$  – Productividad del cultivo bajo condiciones de salinidad (%).

$a$  y  $b$  – Factores del cultivo.

$CE_{es}$  – Conductividad eléctrica del estrato a saturación del suelo.

La ecuación se representa gráficamente como se muestra en la figura 5.10.



**Ilustración 5.10.** Relación de salinidad y producción de los cultivos.

Además, las láminas de riego con lámina de lavado para control de la salinidad se calculan con la fórmula siguiente:

$$L = \frac{RR}{(1 - FL)}$$

$L$  – Lámina de riego ajustada con el factor de lavado (cm).

$RR$  – Requerimiento de riego (cm).

$FL$  – Factor de lavado (decimal).

Donde:

$$FL_{rn} = \frac{CE_r}{(5CE_{er} - CE_r)}$$

$$FL_{rf} = \frac{CE_r}{2 * (CE_{zr})_{máx}}$$

$FL_{rn}$  – Factor de lavado en riego normal (decimal).

$FL_{rf}$  – Factor de lavado en riego frecuente (decimal).

$CE_r$  – Conductividad del agua de riego (ds/cm).

$CE_{zr}$  – Conductividad del agua en la zona de las raíces (ds/cm).

#### 5.2.1.6. Requerimiento de riego

La necesidad o requerimiento de riego teórico mensual es la cantidad de agua que debe suministrarse al cultivo para su desarrollo sano, y corresponde a la suma de las cantidades mensuales de agua transpirada y evaporada del cultivo y del suelo, la cantidad aprovechada para la formación de tejidos, el volumen necesario para el control de la salinidad, menos las aportaciones de lluvia efectiva, del manto freático y del rocío.

$$V_{rr} = V_{tr} + V_{es} + V_{tej} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf} - V_{ro}$$

$V_{rr}$  – Volumen de agua requerido para el riego ( $Mm^3$ ).

$V_{tr}$  – Volumen necesario para la transpiración del cultivo ( $Mm^3$ ).

$V_{es}$  – Volumen necesario para la evaporación del suelo cultivado ( $Mm^3$ ).

$V_{tej}$  – Volumen necesario para la formación de tejidos ( $Mm^3$ ).

$V_{cs}$  – Volumen necesario para el control de sales ( $Mm^3$ ).

$V_{lle}$  – Volumen aprovechado de la lluvia o lluvia efectiva ( $Mm^3$ ).

$V_{mf}$  – Volumen aportado por el manto freático ( $Mm^3$ ).

$V_{ro}$  – Volumen aportado por el rocío ( $Mm^3$ ).

Es importante conocer el concepto teórico del requerimiento de riego y sus componentes, con la finalidad de interpretar las diferentes simplificaciones que se pueden hacer a la fórmula, perdiendo un mínimo de precisión.

En la práctica, los volúmenes de agua correspondientes a transpiración, evaporación y formación de tejidos son difíciles de medir por separado en los campos de riego, por lo que generalmente se hace a nivel de investigación.

También es complicado cuantificar las aportaciones de manto freático, y de rocío, por lo que estos conceptos y los anteriores se han incluido en un solo término denominado “evapotranspiración del agua por los cultivos”. Éste se puede estimar calibrando en campo con modelos de evapotranspiración y utilizando mediciones de humedad en el suelo, para medir el requerimiento de riego del suelo explorado por las raíces del cultivo y considerarlo como la evapotranspiración del cultivo en el periodo considerado entre riegos.

Donde no hay aportaciones naturales de agua durante el ciclo del cultivo, como son la lluvia, el rocío y las aportaciones de manto freático o de flujo subterráneo, el consumo de agua por los cultivos más el volumen requerido para control de la salinidad es igual al requerimiento de riego. Si se considera el concepto por unidad de superficie, se puede expresar en láminas:

$$L_{rr} = L_{et} + L_{cs}$$

*L<sub>rr</sub>* – Requerimiento de riego ( $m^3$ ).

*L<sub>et</sub>* – Volumen evapotranspirado + volumen de formación de tejidos ( $m^3$ ).

*L<sub>cs</sub>* – Volumen de control de sales ( $m^3$ ).

En conclusión, cada caso debe analizarse específicamente para definir los factores que intervienen en la fórmula y aplicarla de acuerdo con los factores involucrados.

Actualmente hay procedimientos para determinar el consumo de agua de los cultivos y el agua que se aprovecha de la lluvia con diferentes alternativas, utilizando el programa *CROPWAT* publicado y diseminado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En este trabajo se utilizó dicho sistema para realizar cálculos de requerimiento de riego por el método de la evapotranspiración de referencia y de la lluvia aprovechable, en un ejemplo de evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión.

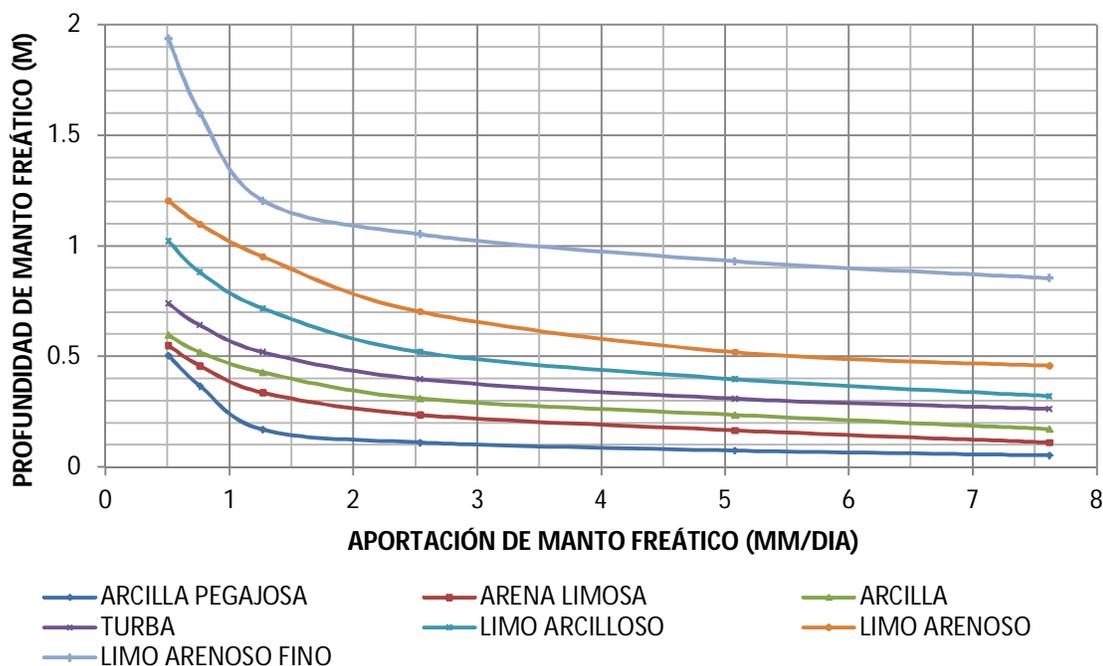
También, la fórmula para calcular la cantidad de agua necesaria para control de sales se presentó en la sección correspondiente a salinidad y aspersión, y se aplicó en el ejemplo de evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión portátil.

#### 5.2.1.7. Aportaciones del manto freático

El requerimiento de riego puede reducirse en los cultivos de las zonas con mantos freáticos con profundidades menores a 2 m, debido a las aportaciones que se generan por el flujo capilar hacia la zona de las raíces del suelo.

Las aportaciones del manto freático dependen de su profundidad y de la textura del suelo, debido a las diferencias de tamaños de los poros capilares. El flujo se establece inicialmente por las fuerzas capilares y, después, el gradiente hidráulico se genera por la extracción de agua de la zona de las raíces.

Las aportaciones del manto freático son aprovechadas para el consumo de agua del cultivo reduciendo el requerimiento de riego. Con la finalidad de dar una idea de las aportaciones que pueden generar algunos suelos, se presenta a continuación la figura 5.11.



**Ilustración 5.11.** Aportación de agua del manto freático a la zona de las raíces por flujo capilar. Gráfica adaptada de Doorenbos y Pruitt, 1977.

### 5.3. ESTADÍSTICA APLICADA AL RIEGO POR ASPERSIÓN

#### 5.3.1. Población, individuo y muestra

##### 5.3.1.1. Población

Para caracterizar cuantitativamente un riego aplicado por aspersión en una parcela, se utiliza como parámetro de referencia la lámina precipitada de lluvia captada durante el riego en una superficie unitaria.

La población en estudio es toda la superficie de la parcela dominada por el sistema de riego por aspersión. Las superficies de las secciones del sistema son subconjuntos de la población y cada uno de estos se forma por individuos. Cada superficie unitaria en que se divide la superficie total del sistema de riego, se considera como un individuo y es representada por la lámina captada en un pluviómetro.

##### 5.3.1.2. Individuo

La lámina precipitada de la lluvia, captada en un pluviómetro, es la altura teórica que alcanzaría el agua de la lluvia precipitada en la superficie del pluviómetro. La lámina se

toma como parámetro de caracterización de cada superficie unitaria regada por aspersión y, ésta, se considera como un individuo de la población.

### 5.3.1.3. Muestra

En general, caracterizar las poblaciones resulta muy laborioso y costoso, por lo que generalmente seleccionamos un subconjunto de la población o muestra; sin embargo, es necesario recalcar que debe ser suficientemente representativo de las características de la población.

### 5.3.2. Medida de tendencia central

#### 5.3.2.1. Media

**Media aritmética simple.** Representa los valores característicos de los individuos de la población o de la muestra. Se calcula sumando cada valor o parámetro que caracteriza a los individuos de la muestra o de la población, y se divide por el total de datos de la muestra:

$$X_m = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{(n-2)} + X_{(n-1)} + X_n}{n}$$

Donde:

$X_m$  – Media aritmética o promedio de la lámina precipitada (mm).

$X_i$  – Valores de la precipitación (mm).

$n$  – Número de datos o valores.

#### 5.3.2.2. Media ponderada

**Media ponderada.** Caracteriza los valores de los individuos de la población o de la muestra, cuando se presentan factores que influyen cuantitativamente asociados a los valores de los individuos y deben ser considerados para que sea representativa.

Gasto medio de secciones de riego de diferentes superficies.

$$Q_{med} = \frac{Q_1 * A_1 + Q_2 * A_2 + \dots + Q_n * A_n}{A_{total}}$$

$Q_{med}$  – Gasto medio de secciones de riego (l/s).

$Q_i$  – Gastos de cada sección (l/s).

$A_i$  – Área de las secciones (ha).

$A_{total}$  – Área total (ha).

$n$  – Número de observaciones.

Presión media de secciones de riego de diferentes superficies.

$$P_{med} = \frac{P_1 * A_1 + P_2 * A_2 + \dots + P_n * A_n}{A_{total}}$$

$P_{med}$  – Presión media de las secciones de riego (kg/cm<sup>2</sup>).

$P_i$  – Presión de cada sección (kg/cm<sup>2</sup>).

$A_i$  – Área de las secciones (ha).

$A_{total}$  – Área total (ha).

$n$  – Número de observaciones.

Lámina media de secciones de riego de diferentes superficies.

$$L_{med\ pond} = \frac{L_1 * A_1 + L_2 * A_2 + \dots + L_n * A_n}{A_{total}} = \frac{\sum_1^n (L_i * A_i)}{\sum_1^n A_i}$$

$L_{med\ pond}$  – Presión media de las secciones de riego (kg/cm<sup>2</sup>).

$P_i$  – Presión de cada sección (kg/cm<sup>2</sup>).

$A_i$  – Área de las secciones (ha).

$A_{total}$  – Área total (ha).

$n$  – Número de observaciones.

### 5.3.2.3. Mediana

Es el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos después que las observaciones se han ubicado en serie ordenada de mayor a menor. Esta medida nos indica que la mitad de los datos se encuentra por debajo de este valor y la otra mitad por encima del mismo. Cuando el número de datos es non, la mediana es el valor central, y cuando es par, el número de orden de la mediana es el número de observaciones más uno entre dos.

### 5.3.2.4. Moda

La moda es el valor que más veces se repite dentro de los datos; es decir, si tenemos la serie ordenada (4, 4, 5 y 7), el valor que más veces se repite es el número 4, el cual es la moda de los datos. Es posible que en algunas ocasiones se presenten dos valores con la mayor frecuencia, lo cual se denomina “bimodal” o, en otros casos, más de dos valores, lo que se conoce como “multimodal”. En algunos problemas se usa el agrupamiento por

clases y la clase que tenga más elementos corresponde a la clase modal y, en ese caso, se considera la moda como el valor medio de la clase.

### 5.3.3. Medidas de dispersión

A continuación, se describen y presentan fórmulas de los parámetros estadísticos siguientes: rango, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación.

#### 5.3.3.1. Rango

Mide la amplitud de los valores de la muestra y se calcula por la diferencia entre el valor más elevado y el valor más bajo.

#### 5.3.3.2. Varianza

Para caracterizar la dispersión de los datos, se trató de usar el promedio de las desviaciones de cada individuo respecto a la media, y como no se puede calcular el promedio real de las desviaciones de cada valor de una población y su media porque la suma de las desviaciones es cero, entonces se propuso la opción de calcular el promedio de los valores absolutos de las desviaciones de los datos respecto a su media; sin embargo, en la práctica estadística se le dio mayor peso a la desviación típica o estándar, que se tratará en el siguiente punto.

Otra opción fue obtener la media aritmética de las desviaciones con respecto a la media de la población, elevadas al cuadrado para eliminar el problema del signo; sin embargo, se cambió el indicador numérico real por un valor subjetivo al elevar al cuadrado cada diferencia. A este parámetro se le denominó “varianza”.

La varianza se calcula como la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de una población y su media. La suma obtenida se divide por el tamaño de la población.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n}$$

$S^2$  – Varianza de la población y.

$X_m$  – Media aritmética o promedio.

$X_i$  – Valores de la variable X.

$n$  – Número de datos o valores.

La varianza siempre será mayor que cero. Mientras más se aproxima a cero, más concentrados están los valores de la serie alrededor de la media. Por el contrario, mientras mayor sea la varianza, más dispersos están.

Cuando se trata de hacer estimaciones de la varianza con datos de una muestra, se utiliza (n-1) en lugar de (n) en el denominador de la fracción en la fórmula y quedan como se presentan a continuación:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1}$$

$S^2$  – Varianza de la muestra.

$X_m$  – Media aritmética o promedio.

$X_i$  – Valores de la variable  $X$ .

$n$  – Número de datos o valores.

### 5.3.3.3. Desviación típica o estándar

Con la finalidad de tener un parámetro estadístico que representara el promedio de las desviaciones con respecto a la media, del orden numérico correspondiente al real, se propuso la desviación típica o estándar. La desviación típica o estándar de la población se calcula como raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n}}$$

$S$  – Desviación típica o estándar de una población  $y$ .

$X_m$  – Media aritmética o promedio de la población.

$X_i$  – Valores de la variable  $X$ .

$n$  – Número de datos o valores.

Cuando se trata de hacer estimaciones de la desviación estándar de una población con datos de una muestra, se utiliza (n-1) en lugar de (n) en el denominador de la fracción en la fórmula y queda como se presentan a continuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1}}$$

$S$  – Desviación típica o estándar de una muestra.

$X_m$  – Media aritmética o promedio de la muestra.

$X_i$  – Valores de la variable  $X$ .

$n$  – Número de datos o valores.

En una población con distribución normal, si se considera el límite inferior representativo, como la media menos la desviación estándar, y el límite superior como la media más la desviación estándar, estos límites incluyen el 68% de los datos de la población, y si fueran dos veces la desviación estándar incluirían el 95% de los datos de la población.

#### 5.3.3.4. Coeficiente de variación

Se calcula como el cociente de dividir la desviación típica entre la media de la población o de la muestra. Se puede representar como porcentaje o como decimal, según sea el interés de uso.

$$CV = \frac{S}{X_m} * 100$$

$CV$  – Coeficiente de variación (%).

$S$  – Desviación típica o estándar de una muestra.

$X_m$  – Media aritmética o promedio de la muestra.

El aspecto interesante del coeficiente de variación es que, al ser un porcentaje o decimal adimensional, permite comparar el nivel de dispersión de dos muestras. Esto no ocurre con la desviación típica, ya que viene expresada en las mismas unidades que los datos de la serie.

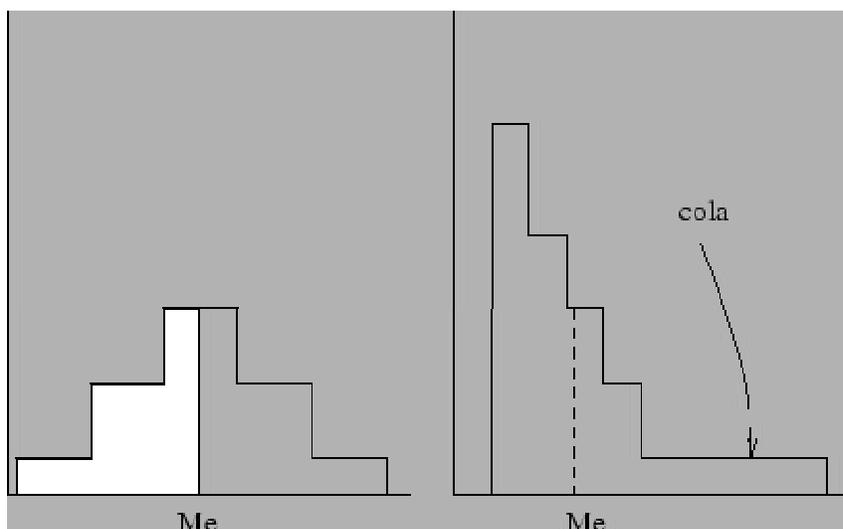
#### 5.3.4. Distribución de frecuencias

En riego por aspersión es muy importante considerar que se manejan dos tipos de datos. Por un lado, se tiene la lluvia que se genera con los aspersores y se mide con pluviómetros y, por otro lado, la descarga de los aspersores de una tubería regante o en una sección que depende de su funcionamiento hidráulico y de sus componentes.

##### 5.3.4.1. Distribución de frecuencias simétrica

Generalmente, la lluvia de los aspersores captada en recipientes o pluviómetros se comporta de manera aleatoria y tiene distribución simétrica; es decir, la media, la mediana y la moda tienden a ser similares, y el número de datos menores y mayores que la media

tienden a ser iguales. Esto implica que se pueden utilizar herramientas estadísticas para su análisis.



**Ilustración 5.12.** Distribuciones de frecuencias simétricas y asimétricas.

A continuación, se presentan datos de pluviometría de un aspersor, su media, mediana y su moda (obtenida formando clases para agrupar datos).

**Cuadro 5.3.** Datos de pluviometría de un aspersor, con efecto ligero del viento.

<b>C</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	6.3	19.9	41.9	47.9	51.9	45.9	41.9	23.9
<b>2</b>	6.3	20.4	40.8	49.5	56.9	53.9	36.9	20.4
<b>3</b>	7.1	21.9	41.9	51.9	61.8	61.8	31.9	17.0
<b>4</b>	7.1	21.2	38.5	47.1	62.8	61.8	30.9	18.0
<b>5</b>	6.3	19.9	31.9	43.9	63.8	61.8	29.9	19.0

De estos datos se obtuvieron:

Media = 35.60.

Mediana = 37.70.

Se agruparon los datos en clases y se encontró que:

Moda = 45.

De estos resultados, se puede interpretar que la media y la mediana tienden a ser iguales, y que la moda por clases se cargó a un valor mayor debido al efecto del viento.

Se calculó que el 47.5% de los datos fue menor que la media, por lo que se concluye que la muestra tiende a ser simétrica y que los parámetros estadísticos son confiables.

Se formó un cuadro de datos con frecuencias de precipitaciones cada 10 mm de lluvia, aproximadamente. En el cuadro se observa que la moda resultante fue la clase 40.1-50.0.

**Cuadro 5.4.** Frecuencias de precipitaciones obtenidas de la lluvia de un aspersor.

CLASE	FRECUENCIA
0.1-10.0	5
10.1-20.0	5
20.1-30.0	6
30.1-40.0	5
40.1-50.0	9
50.1-60.0	4
60.1-70.0	6

#### 5.3.4.2. Distribución de frecuencias asimétrica

Las descargas en tuberías presurizadas a nivel, se generan por diferencias de presiones y dependen de la función de gasto-carga, por lo que se genera un sesgo hidráulico y no puede considerarse un fenómeno aleatorio. Esto genera una distribución de frecuencias asimétrica, en la que la media, mediana y moda son diferentes, por lo que se deben aplicar parámetros estadísticos con las consideraciones especiales para su interpretación.

**Cuadro 5.5.** Gastos de una tubería de riego por aspersión a nivel, calculada con datos de un aspersor y diámetro de tubería regante.

NÚMERO	GASTO (l/s)	NÚMERO	GASTO (l/s)	NÚMERO	GASTO (l/s)
1	0.354	10	0.282	19	0.254
2	0.343	11	0.277	20	0.253
3	0.333	12	0.272	21	0.252
4	0.324	13	0.268	22	0.251
5	0.315	14	0.265	23	0.251
6	0.307	15	0.262	24	0.25
7	0.3	16	0.259	25	0.25

<b>8</b>	0.293	17	0.257	26	0.25
<b>9</b>	0.287	18	0.255	27	0.25

De estos datos se obtuvieron:

Media = 0.278.

Mediana = 0.265.

Se agruparon los datos en clases y se encontró que:

**Cuadro 5.6.** Frecuencias de gastos en una tubería de riego por aspersión.

CLASE	FRECUENCIA
0.250-0.260	12
0.261-0.270	3
0.271-0.280	2
0.281-0.290	2
0.291-0.300	2
0.301-0.310	1
0.311-0.320	1
0.321-0.330	1
0.331-0.340	1
0.341-0.350	1
0.351-0.360	1

Moda = 0.255.

De estos resultados se puede interpretar que la media y la mediana tienden a ser diferentes, y que la moda por clases se cargó completamente a un valor menor debido al efecto producido por el mayor número de aspersores con menor presión generado por las pérdidas de energía del agua en la tubería. En estadística, a este caso se le llama “efecto de cola de datos”.

Se calculó que 62.9% de los datos fue menor que la media, por lo que se concluye que la muestra tiende a ser asimétrica y que los parámetros estadísticos no son confiables, así que deben usarse alternativas que tomen en cuenta esto.

En los cuadros de frecuencias, se observa claramente el efecto de la simetría en el caso de la precipitación, o de la asimetría en el caso de los gastos descargados en una tubería de riego por aspersión.

### 5.3.5. Ejemplos de estadística aplicada en aspersión

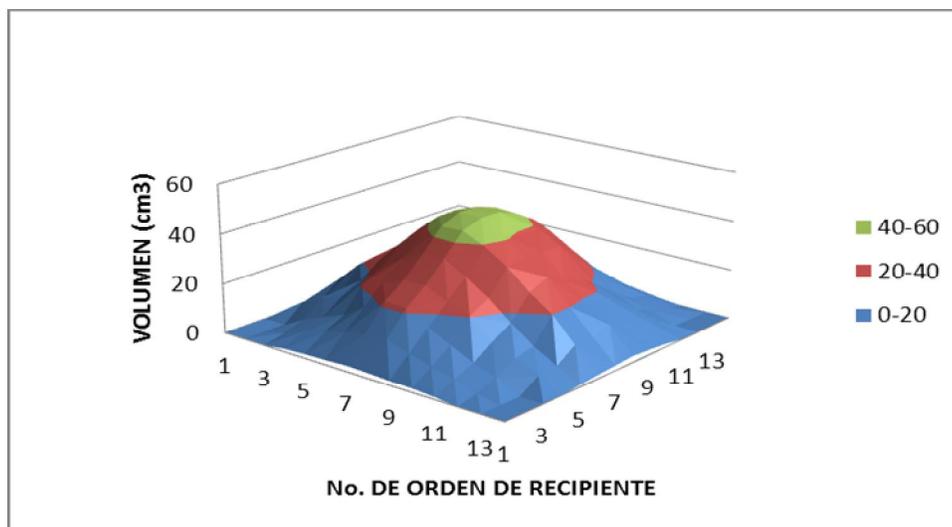
5.3.5.1. Ejemplo 1. Análisis estadístico de la lluvia de un aspersor operando individualmente y con traslapes de lluvia, generados con la precipitación del mismo aspersor

Se realizó una prueba con un aspersor individual durante una hora y se utilizó una cuadrícula de 14x14 pluviómetros, espaciados 2 m entre sí. Los volúmenes captados se presentan en el cuadro 5.7. y en la Ilustración 5.13. Se requiere conocer: la variación de la media, de la varianza, de la desviación estándar, del coeficiente de variación y su relación con la uniformidad de riego al variar los traslapes del aspersor.

**Cuadro 5.7.** Volúmenes (cm<sup>3</sup>) captados en la prueba de un aspersor individual en cuadrícula, con espaciamientos de 2 m entre pluviómetros.

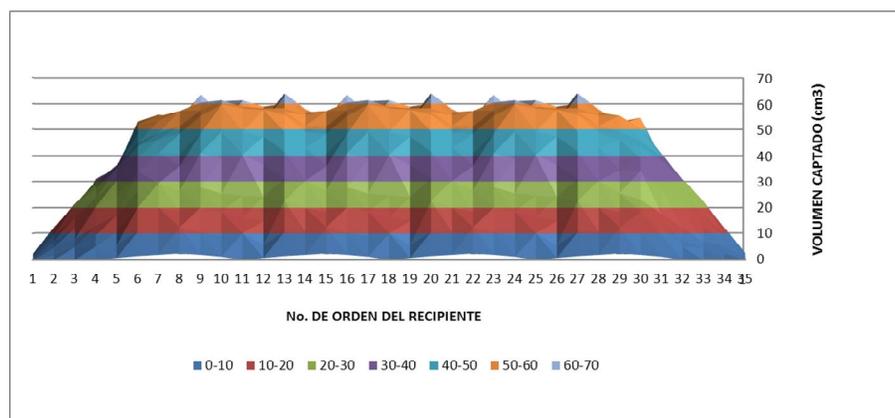
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.00	0.00	0.00	1.18	1.65	1.88	2.36	2.12	1.73	1.57	0.94	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	1.96	5.11	7.15	9.90	11.94	12.33	9.27	6.83	4.63	1.81	0.00	0.00
3	0.00	0.00	4.56	8.17	11.47	16.89	21.60	21.44	16.41	12.10	7.70	4.79	0.00	0.00
4	0.00	6.60	10.76	13.82	20.81	23.95	27.33	27.49	23.56	20.42	12.80	9.03	5.03	0.00
5	1.18	5.11	10.37	17.36	24.74	30.71	34.87	35.42	30.39	24.43	17.20	10.60	5.50	0.79
6	1.88	11.00	19.24	23.17	31.65	37.86	43.20	43.59	39.43	33.85	26.15	20.11	10.60	1.49
7	2.36	11.39	18.46	26.47	35.11	42.80	46.65	46.26	41.08	34.79	29.37	20.03	10.60	1.96
8	2.12	11.23	18.30	26.31	34.16	42.96	46.34	46.10	39.03	34.56	25.53	18.46	12.41	2.51
9	1.96	9.74	20.42	21.52	29.85	40.06	43.59	43.04	39.03	34.16	23.17	18.46	10.45	1.96
10	1.18	5.89	12.17	18.46	25.53	31.97	38.41	38.25	32.67	26.86	17.67	13.74	8.95	1.26
11	0.00	5.65	9.97	13.43	19.79	24.74	31.02	30.79	25.45	19.95	11.86	7.46	5.03	0.00
12	0.00	1.26	5.81	8.80	12.25	17.28	22.54	22.31	16.81	12.02	6.83	4.24	0.00	0.00
13	0.00	0.00	3.14	5.97	8.17	9.82	12.25	12.10	9.58	7.70	5.03	2.51	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	1.10	1.57	2.12	2.75	2.51	1.96	1.49	0.94	0.00	0.00	0.00

En la Ilustración 5.13. se observa el patrón circular del aspersor operando individualmente (Caso 1) y la gran variabilidad de los volúmenes captados por los recipientes. Se puede ver con toda claridad la necesidad de traslapar los volúmenes captados para mejorar la uniformidad de riego.



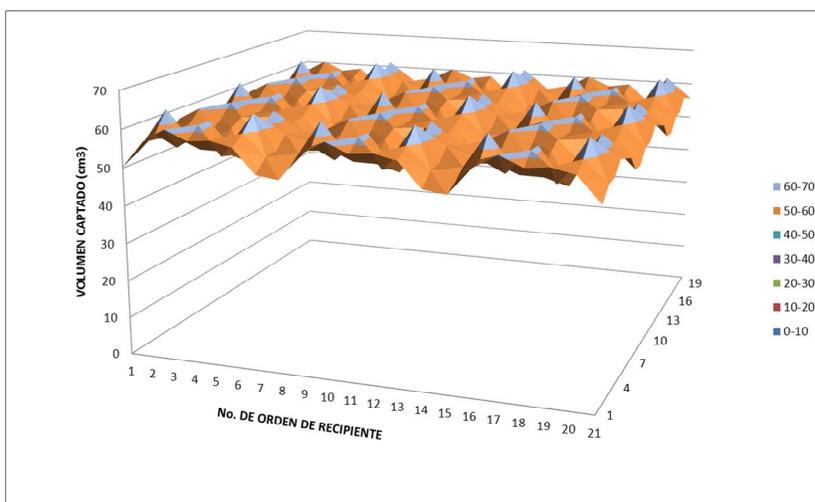
**Ilustración 5.13.** Distribución de la lluvia de un aspersor, funcionando individualmente y sin viento.

En la Ilustración 5.14 se traslaparon las precipitaciones correspondientes a 16 aspersores, formando un cuadrado, y se puede ver que el área central contiene la zona de mayores precipitaciones con buena uniformidad; a los lados, se observa el efecto de orilla. En este caso, se empieza a notar que la uniformidad de riego se puede controlar y que el efecto de orilla tiende a minimizarse.



**Ilustración 5.14.** Perfil de la distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 \* 4 aspersores.

En la Ilustración 5.15 se eliminaron las precipitaciones correspondientes a las orillas, y se puede ver sólo el área central con buena uniformidad. En este caso, se empieza a notar que la uniformidad de riego se puede controlar y que el efecto de orilla tiende a minimizarse mientras más grande es el área regada por los aspersores y menor proporción es ocupada por la orilla sin traslape.



**Ilustración 5.15.** Distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 \* 4 aspersores sin la lluvia de las orillas.

Ya analizados gráficamente los tres casos, se observa en el cuadro 5.6. que en los parámetros estadísticos, al considerar más aspersores, la lámina media tiende a subir (debe llegar a tender a un límite que es el Caso 3, donde no hay efecto de orilla). Esto se debe a que al traslaparse la lluvia se incrementa el agua captada en un mismo sitio, por lo que la media debe ser mayor entre más aspersores traslapen la lluvia sobre ese mismo punto.

En los primeros dos casos, el efecto de orilla genera valores de la varianza y de la desviación estándar altos; sin embargo, cuando llega a 16 aspersores sin efecto de orilla, se obtienen los valores de dispersión más bajos. En el caso del coeficiente de variación, que es un indicador de la desviación correspondiente a la media, es claro que tiende a ser menor, indicando mayor homogeneidad en los volúmenes captados en los recipientes, entre menor es el coeficiente de variación de la información de las muestras.

En el cuadro 5.8. se observa que en el Caso 1 la media y sus parámetros de dispersión son menores que en los Casos 2 y 3. Esto se debe a que sólo se consideró una hora de lluvia y con traslapes se consideraron dos horas de lluvia.

**Cuadro 5.8.** Parámetros estadísticos correspondientes a los cinco casos de traslapes simulados con la información de un aspersor.

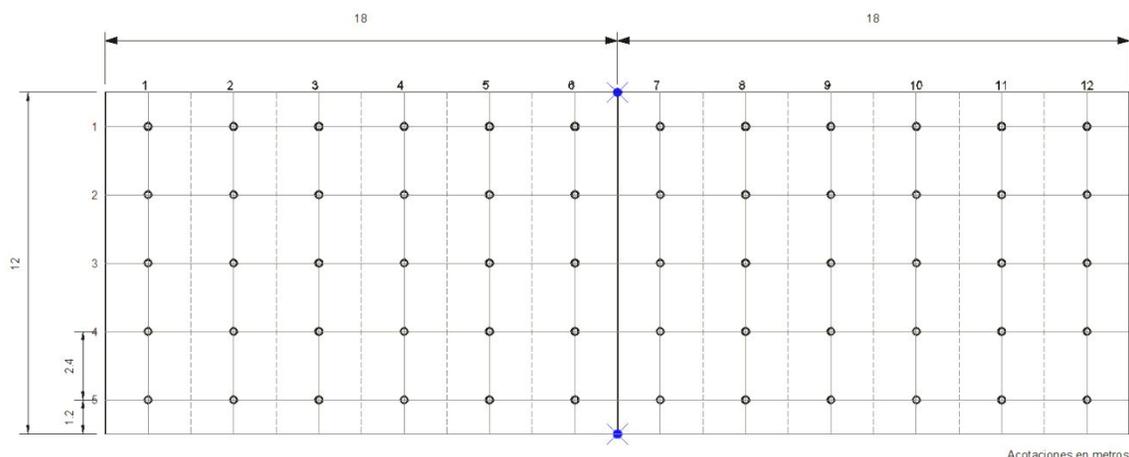
CONCEPTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Media	14.12	36.14	56.46
Varianza	184.73	446.45	12.45
Desviación estándar	13.59	21.13	3.53
Coefficiente de variación	96.28	0.58	0.06
Núm. aspersores	1	16	16

### 5.3.5.2. Ejemplo 2. Estudio estadístico de lluvia generada por una línea de aspersores

El sistema de riego está integrado por una tubería distribuidora y tres tuberías regantes portátiles que operan mediante hidrantes en cada posición, espaciados 18 m; la tubería de riego por aspersión tiene aspersores conectados cada 12 metros.

Como pluviómetros se utilizaron recipientes cilíndricos de 10 cm de diámetro interior y 15 cm de profundidad; el área de captación por recipiente fue de 78.5 centímetros cuadrados.

Con la finalidad de hacer el análisis estadístico de la lluvia, se registraron los volúmenes captados de la lluvia en la prueba de riego por aspersión. Se muestreó un área comprendida entre tres posiciones de tubería regante, espaciadas entre ellas 18 m (largo) y los aspersores instalados estaban separados entre ellos 12 m (ancho). Para obtener la muestra se formó una cuadrícula de 60 puntos (12x5) a los lados de la posición central de la tubería regante y, en cada uno, se instaló un recipiente para captar la lluvia de la tubería regante (Ilustración 5.16).



**Ilustración 5.16.** Distribución en campo de los recipientes o pluviómetros.

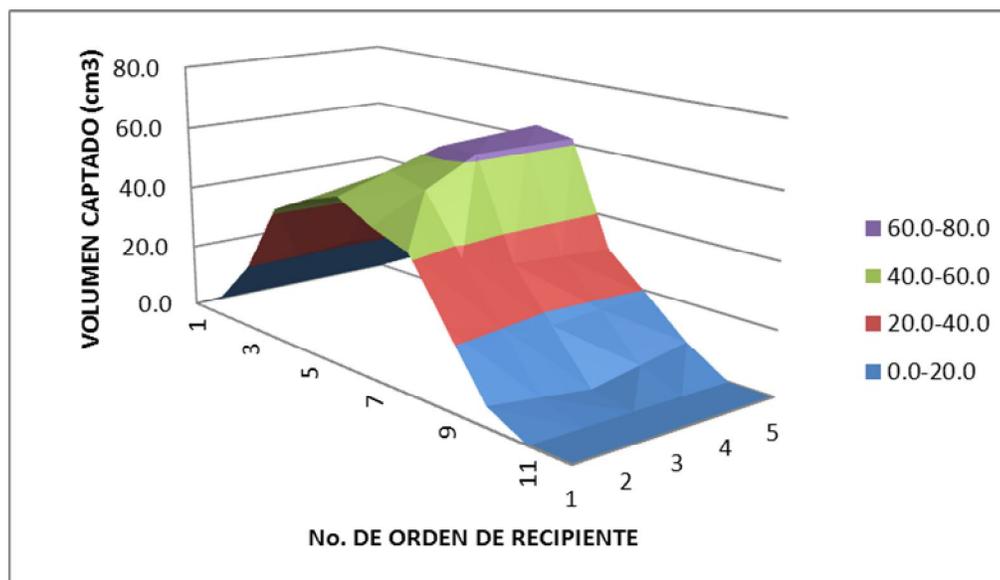
#### Caso 1. Tubería de aspersión operando sin traslapes

La tubería de riego operó una hora en la posición central y se obtuvieron los volúmenes que se presentan en el cuadro 5.9.

**Cuadro 5.9.** Volúmenes captados durante el riego en la posición central.

NÚM. ORDEN DE TRASLAPE	VOLUMEN CAPTADO Y SUMAS SIN TRASLAPE												
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMA
1	0	6.3	19.9	41.9	47.9	51.9	45.9	41.9	23.9	6.0	0.0	0.0	<b>285.6</b>
2	0.0	6.3	20.4	40.8	49.5	56.9	53.9	36.9	20.4	4.0	0.0	0.0	<b>289.1</b>
3	0.0	7.1	21.9	41.9	51.9	61.8	61.8	31.9	17.0	2.0	0.0	0.0	<b>297.3</b>
4	0.0	7.1	21.2	38.5	47.1	62.8	61.8	30.9	18.0	5.0	0.0	0.0	<b>292.4</b>
5	0.0	6.3	19.9	31.9	43.9	63.8	61.8	29.9	19.0	8.0	0.0	0.0	<b>284.6</b>
<b>SUMA</b>	<b>0.0</b>	<b>33.0</b>	<b>103.5</b>	<b>195.0</b>	<b>240.2</b>	<b>297.2</b>	<b>285.3</b>	<b>171.6</b>	<b>98.2</b>	<b>24.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1449.0</b>

En la figura 5.17. se observa que la franja muestreada tiene los volúmenes captados más grandes a lo largo de la tubería, debido al traslape entre aspersores y que se reduce la precipitación hacia las orillas.



**Ilustración 5.17.** Distribución de la lluvia de una línea de aspersores, muestreando el área de influencia equivalente de un aspersor. Perspectiva.

También, se pueden observar que los valores máximos están en la zona central, los valores mínimos en las orillas y la uniformidad de riego es muy baja debido a que falta el traslape entre tuberías regantes. El riego, en estas condiciones, sería inaceptable.

Después de analizar gráficamente la información, se calcularon los parámetros estadísticos y se tiene para el Caso 1 que:

Aplicando la fórmula de la media aritmética, se obtiene:

$$X_m = \frac{1449.0}{60} = 24.1 \text{ cc}$$

Determinando el rango se tiene:

$$R = 63.8 - 0.0 = 63.8 \text{ mm}$$

Se aplicó la fórmula de la varianza y se obtuvo:

$$s^2 = 490.99$$

La desviación estándar es:

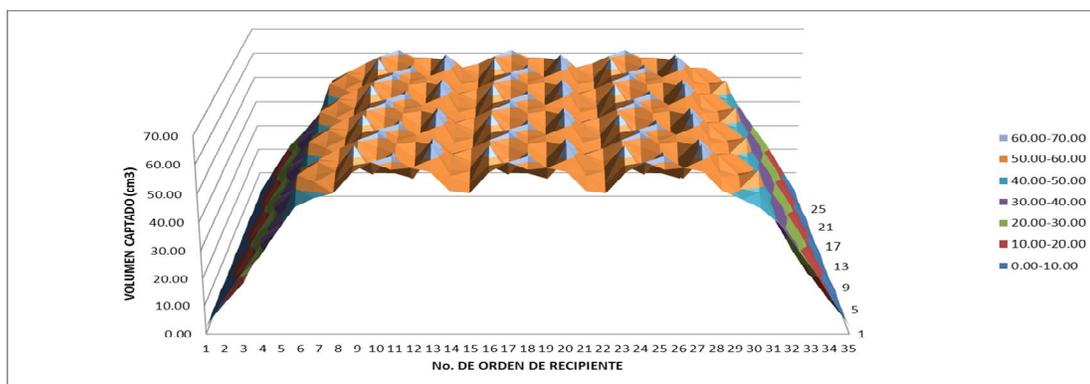
$$s = 22.16$$

El coeficiente de variación se calculó:

$$CV = \frac{22.16 * 100}{24.1} = 91.75$$

Caso 2. Cinco tuberías operando con cinco traslapes

También, se hace la consideración de incluir el traslape de cinco aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes para aumentar el área con traslapes y mejorar la uniformidad de riego. Se obtiene la precipitación como se muestra en la Ilustración 5.18.

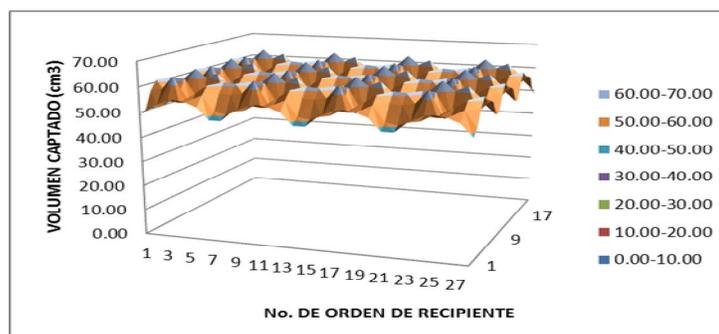


**Ilustración 5.18.** Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Vista en dirección de las tuberías regantes.

Caso 3. Cinco tuberías traslapadas y cinco aspersores traslapados, sin tomar en cuenta la orilla sin traslapes

Con la finalidad de estudiar la uniformidad de la lluvia al considerar sólo área con traslapes, se seleccionó el Caso 2 y se eliminaron las dos orillas de la lluvia, por lo que quedó el área traslapada con alta uniformidad, como se aprecia en la Ilustración 5.19.

Se procedió a calcular los parámetros estadísticos para realizar las comparaciones.



**Ilustración 5.19.** Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Sin considerar las orillas.

Con sólo observar las figuras de distribución de la lluvia o de volúmenes captados, se infiere que la uniformidad de la lluvia aumenta conforme aumentan los traslapes, hasta el Caso 3, donde no se incluyen, y se observa directamente que ya se presenta buena uniformidad. Esta interpretación empírica ayuda a interpretar el orden de magnitud de los parámetros estadísticos.

En el cuadro 5.10 se presentan los resultados de cálculos estadísticos, obtenidos con un programa de cómputo:

**Cuadro 5.10.** Parámetros estadísticos de la evaluación de riego por aspersión de una tubería regante considerando cuatro casos de análisis.

CONCEPTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Media	24.1	45.17	56.07
Rango	63.8	62.44	13.04
Varianza	490.99	324.47	13.55
Desviación estándar	22.16	18.01	3.68
Coefficiente de variación	0.92	0.40	0.07

**Análisis de la media.** En el Caso 1 del riego sin traslape, la prueba duró una hora, por lo que el volumen medio captado fue  $24.1 \text{ cm}^3$ . En el Caso 2, donde hay muchos valores tendientes a la media en el área central, se obtuvo cerca del doble que en el Caso 1, indicando que el efecto de orilla se redujo. En el Caso 3 la media del volumen corresponde a la precipitación promedio de un riego por aspersión en el área efectiva de riego, y se observa que el volumen aplicado no se afecta por el efecto de orilla; por lo tanto, sólo este caso realmente representa el volumen que corresponde al riego; es decir, sin los efectos de orilla.

**Análisis del rango.** En términos generales, en los dos primeros casos el rango no varió debido a que se tomaron en cuenta los valores extremos mínimos y máximos, y no es de utilidad para el análisis de este problema. Fue necesario considerar todos los valores de la precipitación incluyendo ceros, debido a que al traslapar se integrarían datos de lluvia. Sin embargo, en el Caso 3, el rango se redujo drásticamente a 13.04 debido a que se consideraron sólo los valores dentro del área de traslapes sin efectos de orilla.

**Análisis de la varianza.** La varianza en el Caso 1 es muy grande debido a que las desviaciones con respecto a la media son grandes, y se observa en el Caso 2 que al aumentarse el área traslapada se reduce mucho. En el Caso 3, al no haber efecto de orilla, la varianza corresponde a un rango muy reducido, por lo que los volúmenes captados representan mejor el riego aplicado.

**Análisis de la desviación estándar.** La desviación estándar es una estimación de la desviación promedio de los datos respecto a la media. Al considerar la desviación estándar de los volúmenes captados para el riego de los cultivos, es evidente que no pueden aceptarse desviaciones tan grandes como en el Caso 1 sin traslape, porque casi iguala al valor de la media y, en el Caso 3, con traslape y sin efecto de orilla, la desviación estándar fue 15 veces menor que la media, lo que indica que se homogeneizó la población y mejoró la calidad de la distribución del agua.

**Análisis del coeficiente de variación.** El coeficiente de variación en porcentaje, es el porcentaje de la desviación respecto a la media. Esto es muy importante en riego porque las desviaciones negativas de los datos naturales respecto a la media, indican volúmenes menores aplicados al cultivo. Hay dos implicaciones: la primera es que las pruebas de uniformidad de lluvia deben realizarse donde se espera que los aspersores apliquen menos agua, o sea, en el cuarto bajo, para detectar déficits de riego y, la segunda, es que si se quiere compensar el déficit que existe por falta de uniformidad, debería aplicarse un exceso al menos igual al porcentaje indicado por el coeficiente de variación de la lluvia. En los dos primeros casos del ejemplo se pierde el sentido del coeficiente de variación porque las muestras no son representativas del riego y, en el Caso 3, si representa el riego ya se observa que la lluvia está bien distribuida porque el traslape es efectivo.

Del análisis comparativo de los parámetros estadísticos, se concluye que entre mayor es la superficie regada con traslapes de los aspersores y de las tuberías regantes, se riega más uniforme.

Es importante señalar que de acuerdo con la distribución en campo de la o las tuberías de riego, debe seleccionarse el sitio de muestreo, hacerse la consideración del traslape que debe ocurrir cuando se riega normalmente y simularlo para el análisis de la información.

### 5.3.6. Muestreo

El tipo de muestreo que se utiliza en los estudios de riego por aspersión es dirigido o determinístico; es decir, no es un muestreo probabilístico porque la elección de los elementos o individuos depende de las características del estudio y no es aleatoria. Esto implica que de acuerdo con algunos estadísticos no es posible hacer inferencias con los resultados del análisis del muestreo, sin embargo, de la muestra que se obtenga se debe hacer el análisis y llegar a conclusiones para el mejoramiento del sistema de riego, de ahí la importancia que tiene seleccionar bien los sitios de la muestra para evitar llegar a conclusiones falsas.

El muestreo en un sistema de riego por aspersión debe representar por una parte, la distribución hidráulica de la aplicación del agua en el campo, o sea, la descarga de los aspersores y por otra parte la distribución de la lluvia para determinar la uniformidad de precipitación o aplicación del agua al cultivo.

#### 5.3.6.1. Objetivo del muestreo

El estudio que se realiza para la evaluación de un sistema de riego tiene las actividades siguientes: obtener y analizar información cuantitativa para conocer gastos hidráulicos, tiempos de riego, consumos de energía, cultivos, evapotranspiración, intervalos de riego, producción de los cultivos, superficies de riego, volúmenes extraídos o derivados, láminas de riego aplicadas, productividad del agua, eficiencias de riego y parámetros de desempeño de los sistemas de riego.

Como es muy costoso trabajar con toda la información que se puede obtener de los sistemas de riego, se requiere manejar el mínimo de información con el mínimo costo y con información de confianza, por eso, es necesario utilizar las técnicas de muestreo.

Por lo anterior, es necesario obtener información confiable y con el costo mínimo para realizar la evaluación de los sistemas de riego.

Uno de los objetivos del muestreo es obtener información para determinar la uniformidad de distribución hidráulica del sistema de riego. Para esto, deben considerarse las secciones de riego como unidades de evaluación y analizar la variación de la presión o de los gastos proyectados. Con los resultados de esta evaluación deben obtenerse las recomendaciones para mejorar el sistema de riego a nivel de puntos de control; es decir, abriendo o cerrando válvulas para establecer las presiones y los gastos de proyecto o de operación correcta.

Otro de los objetivos del muestreo es obtener información para determinar la uniformidad de descarga de los emisores en tuberías regantes o en secciones de riego. Con esta información se analizará la necesidad de usar diámetros mayores de tuberías, cambiar de boquillas en los aspersores u otros cambios. Mejorar el sistema, en este sentido, asegura que la uniformidad de distribución del agua es uniforme dentro de las secciones de riego o en las tuberías regantes.

Por último, debe tomarse en cuenta la uniformidad de aplicación entre las tuberías de riego y entre los aspersores para determinar los efectos específicos de la uniformidad de la lluvia sobre el terreno o el cultivo, y con los resultados deben tomarse decisiones de cambiar los espaciamientos entre regantes y entre aspersores. También puede ser necesario cambiar boquillas o aspersores, dependiendo del gasto y la presión disponible del equipo de bombeo.

#### 5.3.6.2. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra dependerá básicamente del costo y del tiempo disponible, y debe tomarse en cuenta que el número de muestras influye en la precisión que se obtenga en el estudio. Para que sea representativo el muestreo, es necesario interpretar los desniveles topográficos y las pérdidas de energía en las tuberías, para tomar en cuenta los gradientes que se generan en cada sistema de riego por aspersión. Por esta razón, son muy importantes los conocimientos de hidráulica y topografía del evaluador. En el caso de que el evaluador no sea experto en riego presurizado, debe seguir los procedimientos de muestreo recomendados para asegurar los resultados.

#### 5.3.6.3. Consideraciones generales

Antes de iniciar el muestreo, debe hacerse el análisis del problema para elaborar el plan de trabajo. Se considera el objetivo de la evaluación y se definen los indicadores y parámetros que se utilizarán; se revisa el sistema de riego por componentes, primero el cabezal de control, luego la red de distribución; después los puntos de control de las secciones de riego y, por último, las longitudes de las tuberías de salidas múltiples, como los distribuidores y las tuberías regantes.

Por ejemplo, si un sistema de riego por aspersión tiene una línea principal con diez hidrantes (válvulas de control o unidades de control autónomas, UCA) espaciados 18 m entre ellos, y una tubería regante de 240 m de longitud, que opera siete horas en cada posición, se debe considerar que tiene diez secciones de riego y que deberían muestrearse tres o cuatro tuberías regantes, seleccionando dos posiciones en las orillas. Esto significa usar las tuberías de las posiciones 1 y 10, y además considerar una o dos en la parte intermedia, correspondientes a las posiciones 5 o 6 en el caso de tres o 4 y 7 en el caso de cuatro.

Cuando se muestrea para determinar la uniformidad hidráulica del sistema de riego por aspersión, es importante estudiar la distribución en campo de las tuberías, la planimetría y la altimetría, y la posición del equipo de bombeo, con la finalidad de interpretar los efectos de las pérdidas de carga y de los desniveles del terreno. Con la interpretación anterior, se seleccionan los aspersores que deben ser aforados para determinar la uniformidad de la descarga de los emisores.

De acuerdo con la experiencia y tomando en cuenta lo anterior, se pueden escoger 3, 5, 9 o 16 aspersores de un sistema de riego, tratando que queden distribuidos en toda la superficie de riego. Si el sistema de riego es grande, con topografía irregular y tiene más de trescientas posiciones de aspersores, puede ser conveniente seleccionar 32 aspersores para realizar los aforos.

En el caso del muestreo para determinar la uniformidad de la lluvia, el tamaño de muestra para coleccionar el agua precipitada en un área del campo, es conveniente que sea mínimo de 36 recipientes distribuidos en hileras igualmente espaciadas, y el espaciamiento entre recipientes dentro de las hileras también deben estar a espaciamientos constantes.

## 5.4. COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

### 5.4.1. Aspersores

Los aspersores son dispositivos que funcionan como orificios a presión. Lanzan el agua en forma de chorro, el cual al entrar en contacto con el aire se transforma en gotas generando lluvia artificial. Generalmente, el patrón de mojado es circular. Existen aspersores que pueden mojar sectores de círculo mediante un mecanismo de regulación. Se presenta un aspersor de jardín en la parte izquierda de la figura 4.1.

Los aspersores se pueden clasificar por su tamaño en pequeños, estándar y cañones.

#### 5.4.1.1. Aspersores pequeños

A continuación, se presenta un aspersor versátil que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracterizan por producir gastos del orden de 0.090 a 0.50 l/s, con diámetros de mojado de 7 a 14 m y presiones de trabajo del orden de 1.5 a 4.0 kilogramos por centímetro cuadrado.

El aspersor que se presenta en la parte derecha de la Ilustración 5.20. es un emisor pequeño, de impacto, de ángulo regulable, de gastos, presiones y diámetros de mojado pequeños. Puede regar círculo completo y sectores de círculo, puede funcionar a baja presión y tiene siete boquillas, cinco de ángulo normal y dos de ángulo bajo.



**Ilustración 5.20.** Aspersores pequeños.

Estos aspersores se pueden utilizar en sistema fijos para viveros, invernaderos y jardines; también, para dar riegos de germinación en cultivos de hortalizas.

#### 5.4.1.2. Aspersores estándar

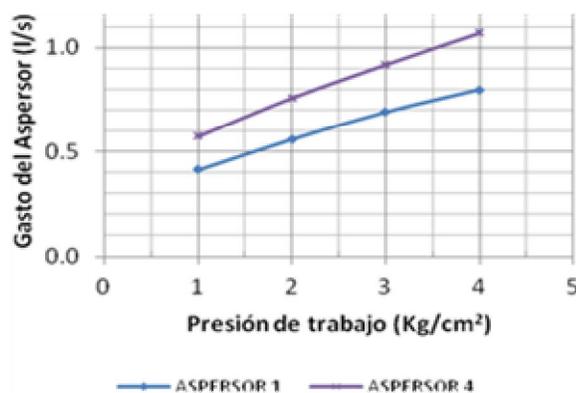
Se presenta a continuación el aspersor estándar como un dispositivo versátil, que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracteriza por producir gastos del orden de 0.40 a 1.10 l/s, con radios de mojado de 12 a 19 m y presiones de trabajo del orden de 1.0 a 4.0 kg/cm<sup>2</sup>. En la Ilustración 5.21. se presenta un aspersor estándar.

Los aspersores estándar se usan generalmente en la agricultura y en jardines; riegan cultivos de cobertura total, como pastos, cereales y alfalfa; también se utilizan en frutales como nogal y plátano.

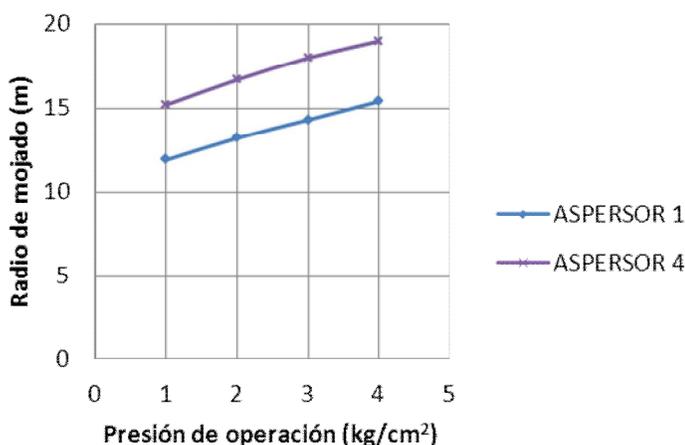


**Ilustración 5.11.** Aspersor de impacto con dos boquillas.

A continuación, se presentan las curvas carga-gasto y presión-radio de mojado de un aspersor estándar (Ilustraciones 5.22. y 5.23.).



**Ilustración 5.22.** Curvas presión-gasto en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.



**Ilustración 5.23.** Curvas presión-radio en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.

Los aspersores estándar se pueden agrupar por el tipo de mecanismo que genera el movimiento de rotación para asperjar el agua como lluvia artificial. Hay aspersores de impacto y de rehilete.

Los aspersores de impacto funcionan girando intermitentemente mediante un mecanismo formado por un martillo y un resorte. El chorro choca con un deflector que impulsa al martillo y lo hace girar contra la resistencia del resorte; luego el martillo, por acción del resorte, golpea el cuerpo del aspersor haciéndolo girar y lanzar el chorro en otra dirección.

Los aspersores de rehilete giran por el impulso hidráulico que genera el cambio de dirección del agua en un conducto curvo de los chiflones del aspersor.

#### 5.4.1.3. Aspersores gigantes

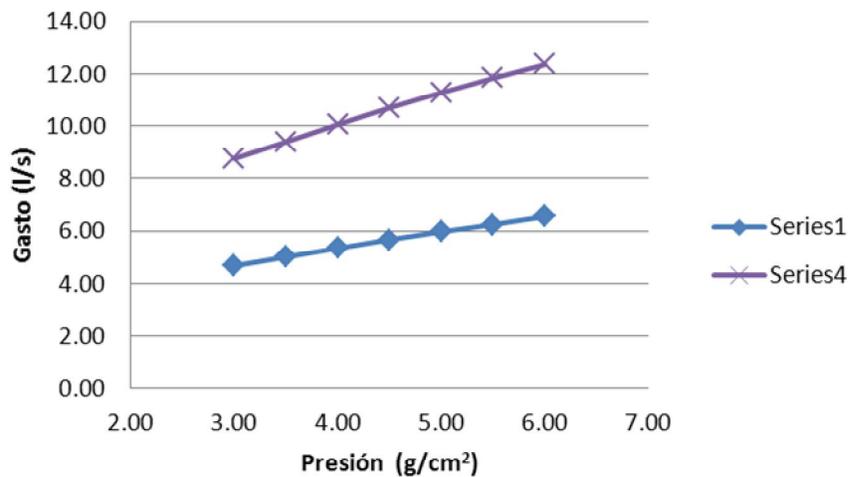
A continuación se presenta un aspersor versátil que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracterizan por producir gastos del orden de 4.0 a 12.0 l/s, con radios de mojado de 30 a 55 m y presiones de trabajo del orden de 3.0 a 6.0 kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores pueden ser mayores, de acuerdo con materiales disponibles en el mercado; sin embargo, en esta época de ahorro de energía es necesario usar aspersores con presiones de operación mínimas.

Los aspersores gigantes (Ilustración 5.24.) se usan generalmente en la agricultura; riegan cultivos de cobertura total como pastos, cereales y alfalfa; también se utilizan en caña.

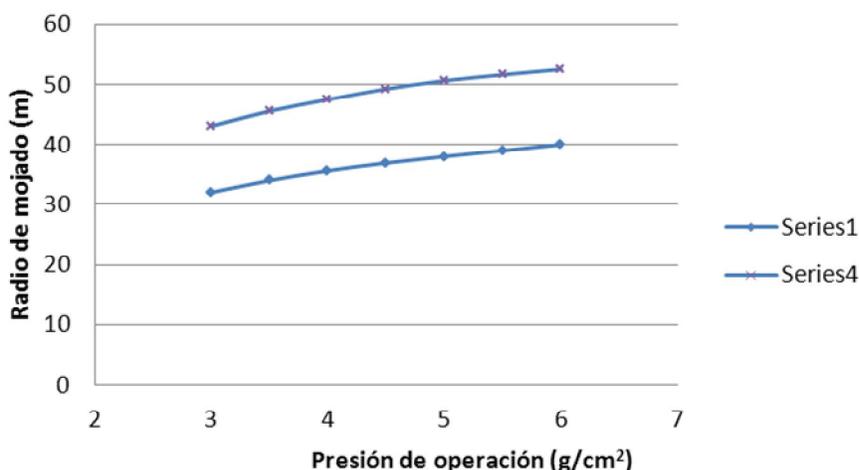


**Ilustración 5.24.** Aspersor gigante o cañón.

A continuación, se presentan las curvas presión-gasto y presión-radio de mojado de un aspersor gigante con dos boquillas (Ilustraciones 5.25. y 5.26.).



**Ilustración 5.25.** Curvas características de aspersores gigantes.



**Ilustración 5.26.** Curvas presión-radio de un aspersor gigante en el rango de operación normal.

#### 5.4.2. Tuberías

En los sistemas de riego por aspersión se usan redes de tuberías para la conducción, distribución y aplicación del agua. Generalmente, las tuberías de conducción y distribución se analizan como tuberías simples y las tuberías de aplicación del agua o regantes se analizan como tuberías con salidas múltiples.

##### 5.4.2.1. Tuberías regantes

Las tuberías regantes son aquellas que tienen integrados los emisores o aspersores para riego y suministran el agua a los cultivos. Se clasifican hidráulicamente como tuberías con salidas múltiples (Ilustración 5.27).

En la práctica se considera que la diferencia de gastos hidráulicos, entre el aspersor de gasto mínimo y el de gasto máximo, no debe ser mayor que el 10% del gasto del emisor con descarga mínima. Esto equivale a que la diferencia de presiones de operación de los aspersores en condiciones de mayor y menor carga de trabajo no debe ser mayor de 21% de la presión menor. En terrenos planos y a nivel, corresponden al primero y al último aspersor de la tubería regante, puesto que la diferencia de presiones se debe a las pérdidas de carga hidráulica de la tubería.

Las tuberías en sistemas móviles de riego por aspersión, generalmente son de aluminio y funcionan con flujo turbulento a alta presión. Los acoplamientos entre las tuberías y sus conexiones con los elevadores de los aspersores generan pérdidas de carga localizadas. Las tuberías de sistemas de riego fijos pueden ser de otros materiales como PVC o polietileno de alta densidad.

Las tuberías portátiles generalmente son de material ligero, como el aluminio o el PVC. Las tuberías son de acoplamiento rápido para conectarse en las válvulas o hidrantes de una tubería de alimentación, o bien, a la tubería principal.



**Ilustración 5.27.** Tubería regante en aspersión.

#### 5.4.2.2. Tuberías de conducción y distribución

La red de conducción y de distribución constituye el conjunto de tuberías que llevan el agua desde la fuente de abastecimiento o unidad de bombeo, hasta la entrada de los laterales. La red está compuesta por tuberías generalmente de PVC o aluminio con sus diferentes accesorios como conectores, válvulas de admisión y expulsión de aire en algunos de sus tramos.

En los sistemas de riego por aspersión, la red de distribución, al igual que las tuberías regantes puede ser móvil, fija o mixta. Se dice que es una red móvil cuando todas las tuberías de conducción y distribución se van trasladando junto con las tendidas de riego. Esto es común cuando la fuente de abastecimiento es un canal y, por lo tanto, se mueve la conducción y, a veces, la planta de bombeo.

Por otra parte, se dice que una red es fija cuando las tuberías están instaladas para cubrir la totalidad del terreno por regar. Esta clasificación se subdivide en fija permanente cuando las tuberías están enterradas, en donde sólo salen del suelo los tubos porta-aspersores; por otro lado, es fija temporal, cuando la red se instala temporalmente al inicio del ciclo agrícola y se levanta después de la cosecha. Se dice que son redes mixtas cuando alguna parte de la red es fija y otra móvil.

En el caso de los sistemas de movimiento continuo como pivote, cañón o avance frontal, la tubería de conducción generalmente es fija y termina hasta el lugar donde se encuentra el

pivote, o bien, la tubería de alimentación se instala dónde están los hidrantes para conectar la motobomba o manguera en el caso del cañón viajero o avance frontal. En algunos casos, puede haber un canal de alimentación donde la motobomba se va desplazando al mismo tiempo que toma el agua para el sistema.

#### 5.4.3. Sección de riego

Las secciones de riego tienen una unidad de control que puede tener una válvula reguladora de presión o gasto, una válvula de apertura y cierre, un manómetro con válvula para purga y accesorios de instalación como niples, codos y coples. La unidad de control más simple en sistemas de riego por aspersión es un hidrante con su manómetro, que funciona para abrir o cerrar el flujo del agua, para regular el gasto o la presión y medir la presión de operación de la tubería regante.

Un grupo de tuberías regantes abastecidas por una tubería distribuidora, que trabajan simultáneamente con una unidad de control o una tubería regante controlada por un hidrante, constituyen una sección de riego.

En el caso de pivotes centrales y tuberías regantes móviles de avance frontal, la tubería regante y el sistema de riego son lo mismo.

Las piezas especiales que más comúnmente se utilizan son los porta-aspersores o tubos elevadores. En general, constan del tubo donde se instala el aspersor, un acoplamiento rápido para unir la tubería con el tubo y un estabilizador para mantener el tubo con el aspersor en forma vertical. El tubo porta-aspersor normalmente es de material de aluminio o PVC y su altura depende del cultivo; oscila entre 0.5 y 2 m. Su diámetro es de 19 a 25 mm ( $\frac{3}{4}$  a 1 pulgada).

#### 5.4.4. Equipos y accesorios hidráulicos

En las redes de conducción y de distribución se instalan piezas especiales que sirven para seguridad, control y operación del sistema de riego. Las principales piezas o accesorios son: válvulas de retención, válvulas de alivio de presión, válvulas de control, medidores de gasto y de presión (manómetros) y, por último, válvulas de admisión y expulsión de aire. Se describen a continuación los principales accesorios hidráulicos.

##### 5.4.4.1. Válvulas

A continuación se presentan varios tipos de válvulas que se utilizan frecuentemente en sistemas de riego presurizado, como son válvulas de retención, de alivio de presión, de control y de admisión y expulsión de aire.

#### 5.4.4.1.1. Válvula de retención

Las válvulas de retención son dispositivos que permiten evitar riesgos o daños en el sistema de bombeo. Las válvulas también llamadas *check* evitan que el agua se regrese hacia la bomba. Al apagar un equipo de bombeo que tiene la tubería contra pendiente, tiende a regresar el flujo y, cuando se cierra la válvula de retención, se genera un golpe de ariete, o sea, una serie de ondas de sobrepresión que pueden afectar a la tubería si no hay válvula de alivio de presión que desfogue agua que rompa la onda de presión. Por otra parte, si la tubería después de la bomba está de bajada, una válvula de admisión y expulsión de aire instalada después de la válvula *check* permite la entrada de aire cuando se apaga la bomba y el flujo continúa hacia aguas abajo, sin generar falla por succión.

#### 5.4.4.1.2. Válvula de alivio de presión

Las válvulas de alivio de presión son indispensables en los sistemas de riego a la salida de la bomba, ya que permiten disipar el exceso de presión debido al golpe de ariete que se genera al cerrar la válvula de retención ocasionado, entre otras causas, por el apagado repentino del equipo de bombeo o el cierre de válvulas durante la operación normal del equipo de bombeo.

Las válvulas de alivio permiten la fuga de agua o aire cuando aumenta la presión sobre un límite preestablecido en la tubería. Esto sucede porque se vence un resorte calibrado a la presión de abertura de la válvula (Ilustración 5.28.).



**Ilustración 5.28.** Integración de válvula de alivio de presión, con válvula de admisión y expulsión de aire, en las funciones de seguridad.

#### 5.4.4.1.3. Válvulas de control

**Válvulas de control.** Se recomienda instalar este tipo de válvulas en sitios estratégicos dentro de la red de conducción principal para aislar tramos de tubería o secciones de riego que no se requiere operar, o se encuentren en reparación durante la operación normal de la temporada de riegos.

Las válvulas de control sirven para cerrar o abrir conductos, de manera parcial o total. Con las válvulas de control puede regularse el gasto o la presión en una tubería. Cerrándolas se reduce el gasto y abriéndolas se incrementa la descarga hidráulica.

#### 5.4.4.1.4. Válvulas de admisión y expulsión de aire

El sistema de riego debe contener válvulas de admisión y expulsión de aire ubicadas en el cabezal de control y a lo largo de la red de conducción y de distribución. El sistema de riego las requiere para la admisión de aire cuando la tubería se vacía y para la evacuación del aire durante su llenado (Ilustración 5.29.). Estas válvulas se requieren, generalmente, cuando la tubería de conducción excede los 500 m de longitud en terrenos planos a nivel o pasa por puntos altos de la parcela, donde puede quedar aire atrapado e impedir el flujo normal del agua en la tubería.



**Ilustración 5.29.** Válvula de admisión y expulsión de aire en conducciones presurizadas.

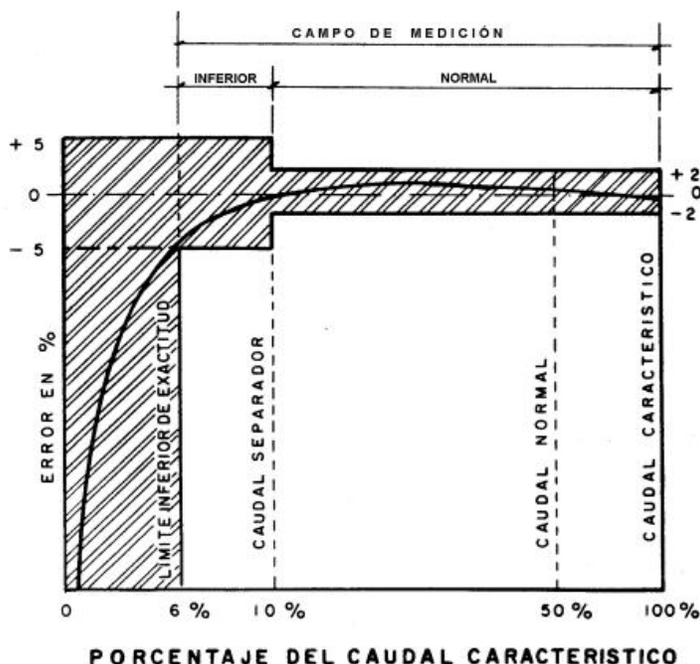
#### 5.4.4.2. Medidores de gasto hidráulico

Los medidores de gasto son dispositivos que relacionan la velocidad del agua y su área de paso. Se calibran de manera tal que indican el gasto hidráulico que pasa por ella. Pueden basarse en la velocidad, en la carga de velocidad o en la velocidad de partículas que fluyen con el agua. Pueden ser de placa de orificio, de tubo Venturi, de tubo Pitot, de propela o turbina, electromagnético y ultrasónico, este último de efecto Doppler o de tiempo en tránsito. Para realizar evaluaciones de sistemas de riego es conveniente tener medidores portátiles, de flujo de alta precisión y amplio rango.

Generalmente, cuentan con indicador numérico o analógico del gasto hidráulico que pasa por la tubería y pueden tener sistema volumétrico de medición. Estos medidores indican directamente el estado del funcionamiento del sistema de riego por medio del gasto de operación del sistema de riego, tal y como se observa en el cuadro 5.11.; la exactitud se observa en la Ilustración 5.30.

Cuadro 5.11. Características de medidores de flujo.

COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS SENSORES DE FLUJO						
Sensor de flujo	Líquidos recomendados	Pérdida de carga	Exactitud típica en %	Medidas y diámetros	Efecto de viscosidad	Costo relativo
Placa de orificio	Sucios y limpios, algunos líquidos viscosos	Medio	De 2 a 4% escala total	10 a 30%	Alto	Bajo
Tubo Venturi	Viscosos, sucios y limpios	Bajo	1%	5 a 20%	Alto	Medio
Tubo Pilot	Limpios	Muy bajo	3 a 5%	20 a 30%	Bajo	Bajo
Propela	Limpios y viscosos	Alto	.25%	5 a 10%	Alto	Alto
Electromagnético	Sucios y limpios, líquidos viscosos y conductores	No	.05%	5	No	Alto
Ultrasónico (Doppler)	Sucios y limpios, líquidos viscosos y conductores	No	5%	5 a 30%	No	Alto
Tiempo en tránsito	Limpios y líquidos viscosos	No	1 a 5%	5 a 30%	No	Alto



**Ilustración 5.30.** Exactitud en el campo de medición.

#### 5.4.4.2.1. Medidores de presión diferencial

Estos aparatos reducen el área de paso y crean una pérdida de carga, con reducción en la carga piezométrica aguas abajo del dispositivo. Dentro de este grupo de medidores se encuentran los de placa orificio y los Venturi.

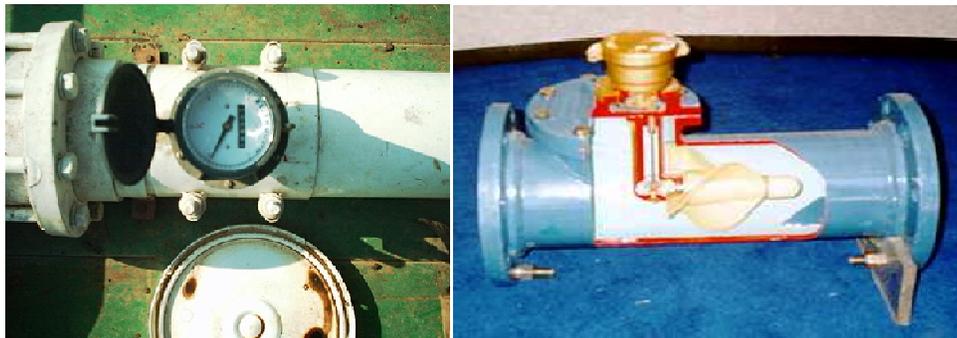
#### 5.4.4.2.2. Medidores de gasto de placa de orificio

El medidor consiste en una placa con un orificio de diámetro menor que el de la tubería. Se instala perpendicularmente al flujo del agua y está calibrada de acuerdo con las pérdidas de carga que se generan al pasar el agua por el orificio. El indicador de pérdida de carga puede ser piezométrico diferencial; esto es, que mide la presión antes y después de la placa con piezómetros o manómetros, y restar las presiones para determinar las pérdidas de carga que corresponden al gasto que está pasando, o bien, con medidor de sensores de presión electrónicos. En el último caso, se puede proporcionar el gasto

instantáneo y el volumen que pasa en cierto intervalo de tiempo. Puede generar pérdidas de carga del orden de 1 a 3 m y se usa en tuberías principales.

#### 5.4.4.2.3. Medidores de gasto de propela y turbina

Los medidores de propela son dispositivos que tienen una hélice, o propela (Ilustración 5.30.) o una turbina, que gira al pasar el agua por el medidor. El número de vueltas de la hélice o turbina está relacionado con el volumen que pasa por la tubería. Puede tener indicador de gasto instantáneo e indicador volumétrico. Tienen pérdidas de carga del orden de 0.7 m para gastos máximos de operación y se usa en tuberías principales. Requiere de mantenimiento y recalibración permanentemente. En campo, por lo general, no se les da servicio de mantenimiento y luego se dice “que fallan”.



**Ilustración 5.31.** Medidor de propela para tuberías.

#### 5.4.4.3. Medidor de presión

Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión en diferentes puntos del sistema de riego. Tienen sensores que indican las presiones de operación y generalmente son mecánicos con carátula (Ilustración 5.32.). No generan pérdidas de carga en las tuberías. Los sistemas de riego por aspersión se pueden supervisar en el cabezal de control, leyendo la presión de operación del sistema en el momento de la inspección, debido a que para cada gasto del sistema corresponde una presión de operación.

Es común que no se operen correctamente las tuberías portátiles de riego por aspersión porque los regadores no están capacitados para medir la presión de operación en la entrada de la regante, y tampoco usan manómetros en los codos de arranque o manómetros con tubos Pitot para medir la presión de operación de los aspersores y verificar la presión de operación en la regante.



**Ilustración 5.22.** Manómetros con glicerina (reductora de vibraciones).

#### 5.4.5. Sistema de bombeo

En los sistemas de riego por aspersión el cabezal de control tiene como funciones principales: a) controlar el gasto hidráulico del sistema de riego, b) proteger el equipo de bombeo, c) medir el gasto y la presión a la salida del equipo de bombeo y d) inyectar agroquímicos al sistema de riego. Para cumplir con estas funciones se requiere un aprovechamiento hidráulico como pozo de un acuífero, una obra de toma o un cárcamo de una fuente de suministro de agua superficial, de sistema de bombeo, de la subestación eléctrica, e incluye equipo de inyección de agroquímicos y accesorios.

##### 5.4.5.1. Unidad de bombeo

El sistema de bombeo está integrado por el equipo de bombeo, el sistema eléctrico, la obra civil complementaria, el equipo de fertirriego y los accesorios.

De acuerdo con la fuente de abastecimiento es el tipo de aprovechamiento y, por lo tanto, los componentes del sistema de bombeo. En los aprovechamientos de acuíferos subterráneos se usan equipos de bombeo de pozo profundo, y en los aprovechamientos superficiales generalmente se utilizan equipos de bombeo de eje horizontal (Ilustración 5.33.).

En el caso de los sistemas de bombeo de pozo profundo, se requiere de la perforación del pozo y de la construcción de un brocal que proteja el pozo al instalar y operar el equipo de bombeo, de la bomba misma y de la subestación eléctrica. Generalmente, los equipos de bombeo son de turbina vertical o sumergible. En este último caso, donde el ademe permita el paso de arena, los equipos de bombeo deben ser resistentes a la abrasión y es necesario poner un hidrociclón para decantar la arena y prevenir problemas de desgaste de tuberías o taponamientos.

En el caso de los aprovechamientos superficiales, normalmente se requiere de un cárcamo de bombeo como obra de aprovechamiento. El cárcamo es una obra compuesta principalmente de un acceso para el agua y de una fosa para extraer el agua con el equipo

de bombeo. La fosa es depósito excavado o acondicionado en la fuente de abastecimiento.



**Ilustración 5.33.** Motobomba centrífuga diesel remolcable.

El equipo de bombeo consiste de una bomba hidráulica y su motor, que proporciona la energía necesaria para mover el agua desde el cárcamo hasta su aplicación en los emisores de la parcela. El motor puede ser eléctrico o de combustión interna. En las plantas de bombeo, para los sistemas de riego, se emplean los siguientes tipos de bombas: de eje horizontal, llamadas simplemente centrífugas; las de eje vertical, conocidas como bomba turbina vertical, y las sumergibles (Ilustración 5.34.).



**Ilustración 5.34.** Cárcamo rectangular y planta de bombeo con bombas de turbina vertical.

#### 5.4.5.2. Subestación eléctrica

El sistema eléctrico completo consta de una subestación eléctrica que incluye postes, acometidas, apartarrayos, cuchillas, transformador, tuberías, arrancadores, y su estructura

de montaje, cables, interruptor y un medidor de voltaje. En el caso de motores de combustión interna ninguno de los materiales anteriores es necesario, pero sí es indispensable tener un tanque de almacenamiento temporal de combustible (Ilustración 5.35.).



**Ilustración 5.35.** Subestación eléctrica.

La obra civil complementaria consta de un sistema de prefiltrado o un estanque decantador, un cárcamo de bombeo, una losa de apoyo, una caseta y un nicho de motores. En algunos casos, es conveniente acondicionar un patio de maniobras y una malla cerca para proteger la unidad de bombeo y la unidad de control general.

#### 5.4.5.3. Obra de toma

La razón de separar la obra de toma del resto de los componentes de la unidad de bombeo es que, en algunos casos donde hay carga hidráulica disponible, no se requiere de un equipo de bombeo, pero sí de una obra de toma (Ilustración 5.36.).

En general, se puede decir que la obra permite tomar el agua de la fuente de abastecimiento para conducirla hasta el cárcamo de bombeo. Las partes de la obra de toma son: el acceso, la estructura de entrada, las rejillas de prefiltrado o malla de filtrado, el mecanismo de control y el conducto.



**Ilustración 5.36.** Obra de toma con rejilla y trampa de azolves.

## **5.5. LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN**

Para evaluar sistemas de riego por aspersión es necesario conocerlos en sus componentes y su funcionamiento, porque el método de evaluación varía de acuerdo con sus características. Hay muchos tipos de sistemas de riego por aspersión y pueden ser agrupados en tres clases según su movimiento dentro del terreno: a) sistemas de aspersión fijos, b) sistemas de aspersión semifijos y c) sistemas de aspersión móviles. En este libro se presentan algunos de los sistemas de riego por aspersión típicos.

### **5.5.1. Sistemas fijos**

Los sistemas de riego fijos tienen las tuberías de conducción, distribución y regantes enterradas. Sólo las unidades de control autónomas, los elevadores y los aspersores salen del suelo y tienen la fuente de suministro de agua y la planta de bombeo fijas. Deben tener el número de tuberías regantes necesario para dominar todo el campo sin mover las tuberías.

Los sistemas de riego por aspersión fijos son frecuentemente usados para regar jardines y campos deportivos. Su costo inicial es muy alto, pero el costo de la mano de obra y de operación es muy bajo. Generalmente se utilizan para regar frutales como nogal y plátano; también se usan en viveros. Los sistemas fijos tienen aspersores pequeños de ángulo bajo (subfoliar), superando en gasto y alcance a los microaspersores. Se usan para pastizales, caña y palma con aspersores gigantes. En la Ilustración 5.37. se observan aspersores portátiles conectados a un elevador fijo o permanente.



**Ilustración 5.37.** Sistema de riego por aspersión permanente.

### 5.5.2. Sistemas semifijos

Los sistemas semifijos son similares a los sistemas completamente portátiles, con excepción de que se usan en un sitio durante todo el ciclo de cultivo. Las tuberías de conducción y distribución, en algunos casos, están enterradas. Las tuberías laterales o regantes se alimentan de hidrantes y se pueden mover manual o mecánicamente con un motor. Se usan para regar hortalizas o dar riegos de germinación, como se puede ver en la Ilustración 5.38.

Estos sistemas de riego en los cultivos anuales se instalan después de la siembra, con tuberías regantes espaciadas igual que en los sistemas portátiles, sólo que no se trasladan a otras posiciones y permanecen en el sitio hasta el momento de ser removidos para las operaciones de la cosecha. Retornan hasta la siguiente siembra o son transferidos a otra parcela.



**Ilustración 5.38.** Sistemas de aspersión semifija para siembra de hortalizas.

### 5.5.3. Sistemas móviles

Los sistemas de riego por aspersión móviles pueden agruparse en sistemas portátiles de movimiento intermitente y de movimiento continuo. Los portátiles son tuberías laterales que riegan en una posición el tiempo necesario para aplicar la lámina de riego proyectada, y después se mueven cambiando de posición. Los segundos riegan durante su movimiento de traslado.

#### 5.5.3.1. Sistemas portátiles de movimiento intermitente

Estos sistemas de riego son completamente portátiles y se componen de motobomba (Ilustración 5.39.), tuberías de conducción, distribución, regantes con sus aspersores y accesorios. Todas las tuberías del sistema de riego generalmente son de aluminio y se pueden mover de una sección de riego a otra; se dividen en movimiento manual y movimiento mecánico.



**Ilustración 5.19.** Equipos de bombeo de sistemas de riego por aspersión portátil preparado como remolque para transportarse con tractor.

#### 5.5.3.1.1. Sistemas portátiles de movimiento manual

Los sistemas completamente portátiles de parcelas pequeñas tienen equipo de bombeo, tuberías de conducción, distribución y regantes de diámetros (de 50 a 75 mm) y tramos de tubo con longitudes aproximadas de 3, 6 y 9 m que permiten su transporte manual. Por lo común, la planta de bombeo está montada en un remolque y se traslada con tractor. En la Ilustración 5.40. se observa un sistema de riego operando durante una práctica de evaluación de riego por aspersión. El sistema de riego es portátil manual con varias tuberías regantes operando simultáneamente.



**Ilustración 5.40.** Sistema de riego por aspersión portátil manual de varias tuberías regantes operando simultáneamente.

En los sistemas de riego portátiles movidos manualmente el espaciamiento entre aspersores varía desde 6 m y 12 m; el espaciamiento entre posiciones de tuberías regantes varía entre 12 y 18 metros.

En la Ilustración 5.41. se observa a dos trabajadores preparando la evaluación de un sistema de riego. También se puede ver una parte del sistema portátil manual, con dos regantes y un distribuidor. En este caso, se pretende captar la lluvia de dos regantes operando al mismo tiempo para verificar el traslape del chorro de agua y obtener la uniformidad de distribución de la lluvia.



**Ilustración 5.41.** Sistema de riego por aspersión portátil manual con distribuidor y regantes.

En la Ilustración 5.42., se puede ver operando una tubería regante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con elevadores y aspersores de ángulo alto.



**Ilustración 5.42.** Tubería regante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con elevadores.

En la Ilustración 5.43. se muestra un aspersor gigante o cañón portátil, operando sobre su elevador.



**Ilustración 5.43.** Aspersor gigante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con su elevador.

#### 5.5.3.1.2. Sistemas portátiles de movimiento mecánico

Son sistemas de riego que básicamente tienen líneas regantes o laterales apoyadas en una serie de ruedas. La tubería regante permanece en una posición durante la aplicación del agua en el riego y deja de funcionar para trasladarse a la siguiente posición mediante el rodamiento de la tubería. Los aspersores están conectados a la tubería de 100 mm de diámetro montada en las ruedas, con un dispositivo sin fin, de manera que al girar la tubería, la posición del aspersor queda normal con posibilidad de regar correctamente debido a un contrapeso. El espaciamiento entre aspersores por lo general es de 12 m, y el espaciamiento entre posiciones de regante es de 18 m. Sin embargo, los hidrantes normalmente se instalan cada 54 m utilizando una manguera que les permite regar tres posiciones del equipo de riego.

Estos sistemas de riego se utilizan en terrenos rectangulares porque la tubería regante se mueve perpendicularmente a la orilla del terreno. En la Ilustración 5.44. se puede ver la caja amarilla donde está el motor y también el sistema de ruedas de soporte del motor. Éste hace girar la tubería regante sobre su propio eje, que genera la tracción para realizar el avance de la tubería regante, rodando sobre su propio eje.



**Ilustración 5.44.** Motor y sistema de tracción para generar el avance de la tubería regante, rodando sobre su propio eje.

En la Ilustración 5.45. se observa un aspersor con contrapeso conectado a la tubería rodante del sistema de riego. En la Ilustración 5.46. se puede ver un aspersor con contrapeso conectado al final de la tubería rodante. Estos contrapesos sirven para que el aspersor quede en posición de operar correctamente, sin importar la posición de giro de la tubería regante. Debe evitarse que el chorro pegue en la tubería para regar bien.



**Ilustración 5.45.** Aspersor con contrapeso conectado a la tubería rodante en posición incorrecta de riego.



**Ilustración 5.46.** Aspersion con contrapeso conectado al final de la tubería rodante en posición correcta de riego.

#### 5.5.3.2. Sistemas de movimiento continuo

Los sistemas de riego por aspersion de movimiento continuo aplican el agua al terreno y a los cultivos durante su movimiento y pueden ser cañones viajeros, regantes con pivote central y regante de avance frontal.

##### 5.5.3.2.1. Cañón viajero

Los sistemas de riego de cañón viajero están compuestos por la unidad de bombeo, fuente de energía, tubería principal, hidrantes, manguera flexible, unidad móvil o viajera y el aspersion regante o cañón.

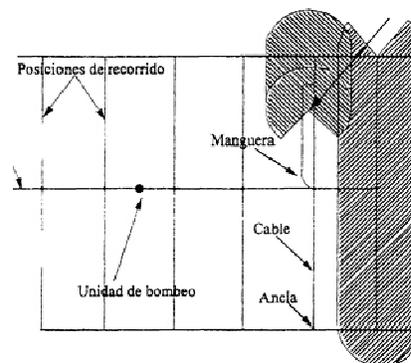
El cañón viajero es un aspersion gigante (Ilustración 5.47.) con una unidad de enrollamiento de manguera y transporte con ruedas (Ilustración 5.48.). La unidad se coloca en una posición al final de la trayectoria y se une con una manguera flexible, la cual está conectada a un hidrante para el suministro del agua. El cañón viajero generalmente es jalado por un cable o por la misma manguera. La longitud de la manguera es del orden de 200 m, y si se coloca regando hacia dos lados, cubre una longitud de 400 m, aproximadamente. Riega una franja de terreno cuyo ancho depende del alcance del cañón, y puede variar el espaciamiento entre posiciones de la manguera entre 40 y 110 metros.



**Ilustración 5.47.** Aspersor de cañón viajero.



**Ilustración 5.48.** Enrollador de cañón viajero.



**Ilustración 5.49.** Trazo de riego de un cañón viajero.

### 5.5.3.2.2. Regante de pivote central

Esta máquina de riego es una tubería regante con aspersores o microaspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo o pivote, donde tiene la entrada del agua. La tubería es soportada por torres metálicas, movidas con dos ruedas instaladas en su base y autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula el avance de cada torre. Si la alineación falla, debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento.

La tubería regante del pivote central generalmente tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado diferentes a lo largo de la tubería, con la finalidad de compensar la velocidad tangencial de cada punto de la tubería regante. Entre mayor es el radio que corresponde a la posición de un aspersor, mayor es el área que riega; por lo tanto, se requiere mayor gasto para igualar las láminas de riego.

En la Ilustración 5.50. se observa una estructura de pivote con el inicio de la tubería regante y la caja de controles de color azul. Ahí se programa la velocidad de rotación para controlar la lámina de riego. A mayor velocidad de la tubería regante, menor lámina de riego aplicada, y a menor velocidad de la tubería, mayor tiempo de oportunidad de captación de agua en el suelo. También se observa una tubería regante de otro pivote con torres de apoyo con ruedas.



**Ilustración 5.50.** Sistemas de riego con pivote central para permitir el giro de la tubería regante.

### 5.5.3.2.3. Tubería regante de movimiento frontal o avance frontal

En este sistema de riego, la tubería regante o el lateral se mueven continua, lineal y perpendicularmente a lo largo de una tubería de distribución con hidrantes, complementado con una tubería flexible, o bien, de un canal recto de suministro de agua

en una orilla de la parcela y una motobomba integrada a la primera torre para suministrar el agua y presurizar el sistema. Sirve para regar terrenos rectangulares.

La tubería es soportada por torres metálicas y es movida por ruedas autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula la velocidad de cada torre.

Si la alineación falla debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento.

La tubería regante de avance frontal tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado constante a lo largo de la tubería, con la finalidad de aplicar lámina de riego uniforme a lo largo de la tubería regante.

En las Ilustraciones de la 5.51 a la 5.53. se observa un sistema de riego de tubería regante de avance frontal, incluyendo la fuente de abastecimiento, un hidrante, la tubería de suministro, el aspersor del sistema y la estructura de soporte de la tubería con una torre.

Cuando la fuente de abastecimiento de agua es un acuífero con equipo de bombeo de gasto relativamente pequeño, se pueden usar tanques de almacenamiento temporal del agua, de manera que el equipo de bombeo trabaja todo el día y se extrae el agua del estanque, sólo en las horas de operación, de acuerdo con la capacidad del equipo de riego.



**Ilustración 5.51.** Tanque de almacenamiento de la descarga de un equipo de bombeo de pozo profundo, para el riego de una tubería regante de avance frontal.

En la Ilustración 5.52., del lado izquierdo, se ve una persona operando un hidrante para suministrar agua a la tubería de avance frontal y la calle donde avanza el sistema de riego. Además, en la fotografía del lado derecho se observa la torre inicial de la tubería regante.



**Ilustración 5.52.** Hidrante para el riego de una tubería regante de avance frontal.

En la Ilustración 5.53., del lado izquierdo, se observa un microaspersor operando y, en la del lado derecho, se puede ver la tubería regante de avance frontal con su estructura y una torre.



**Ilustración 5.53.** Microaspersor y tubería regante de avance frontal.

## 5.6. EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

Para conocer el grado de aprovechamiento del agua y el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se requiere realizar evaluaciones agronómicas, hidráulicas y económicas. Con los resultados de los indicadores de desempeño deben darse las recomendaciones para el mejoramiento del sistema o de la operación y, en el caso que los indicadores sean excelentes, felicitar al productor por tener un sistema bien diseñado y bien operado.

A continuación, se tratan los tres tipos de evaluación.

### 5.6.1. Evaluación agronómica

Los principales indicadores agronómicos del grado de aprovechamiento de un sistema de riego son: la productividad del agua en la cosecha y la eficiencia global del sistema de riego.

Las recomendaciones que deben generarse del análisis agronómico del sistema de riego deben ser acerca de cuándo, cuánto y cómo regar para mejorar la productividad de los cultivos y la calidad de los productos, y usar racionalmente el agua de riego sin erosionar, sin desperdicios y sin contaminar el entorno.

#### 5.6.1.1. Productividad del agua

El objetivo principal del riego por aspersión es contribuir con el desarrollo y la producción de los cultivos, de manera que entre mejor se utilice el agua, el beneficio será mayor, incluyendo la productividad de los cultivos, el aprovechamiento de los fertilizantes, el ahorro de energía y reducción de contaminación de drenes o del subsuelo.

La productividad del agua es el cociente de dividir la cantidad total del producto de la cosecha obtenido entre el volumen total de agua utilizado en la producción. También se usa la productividad en términos económicos; una opción es dividir el valor total de la cosecha entre el volumen total de agua utilizado y, otra opción, es usar el valor de la utilidad económica entre el volumen total de agua utilizado. Entre menor es el volumen de agua utilizado para producir una cosecha del mismo nivel de producción, es mayor la productividad del agua.

En la productividad de los cultivos influyen la calidad, cantidad y la oportunidad de aplicación del agua de riego. A continuación, se presentan algunos conceptos que permiten conocer las ventajas de usar el riego por aspersión debido a sus características de operación, como es aplicar láminas de riego pequeñas, uniformes y frecuentes.

En la producción de hortalizas para cosechar frutos frescos y jugosos, se requiere mantener altos niveles de humedad aprovechable en el suelo durante todo el ciclo de cultivo para que las plantas no se estresen o presenten síntomas de falta de turgencia en sus células y tejidos. Cuando aparecen los síntomas visibles de marchitamiento o flacidez en un cultivo de hortalizas, ya se ha generado un daño irreversible en el cultivo, que representa reducción en la calidad o cantidad del producto, por lo que debe evitarse agotar la humedad fácilmente aprovechable en el suelo.

En el cultivo de la caña, cuando se presenta déficit de agua durante el crecimiento de las plantas, se manifiesta en el tallo con canutos (parte entre dos nudos del tallo de la caña más pequeños) de menor tamaño, por lo que también debe mantenerse durante todo el ciclo con altos niveles de humedad fácilmente aprovechable.

Por otra parte, en cultivos de gramíneas, se sabe que pueden resistir ciertos niveles de estrés durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo y, si en las etapas de floración y fructificación tienen niveles altos de humedad fácilmente aprovechable, pueden producir altos rendimientos de grano, con poca paja. Por lo anterior, si sólo interesa la producción del grano, se debe producir con la mínima cantidad de agua para obtener el máximo de producción.

Para regar con alta productividad en un ciclo de cultivo, es necesario regar eficientemente en cada riego y en el momento oportuno, por lo que las láminas de riego deben ser de la magnitud que garantice el requerimiento de riego y humedezca el suelo hasta capacidad de campo en el espesor aprovechable por la raíz del cultivo, así como en el intervalo de tiempo adecuado para que no se castigue al cultivo.

Para conocer la productividad del agua es necesario medir el rendimiento obtenido en el cultivo y el volumen de agua utilizado.

$$PA = \frac{RC}{VA}$$

*PA – Productividad del agua (t/Mm<sup>3</sup>).*

*RC – Rendimiento del cultivo (t).*

*VA – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm<sup>3</sup>)*

$$PA = \frac{VC}{VA}$$

*PA – Productividad del agua (\$/Mm<sup>3</sup>).*

*VC – Valor de la cosecha (\$).*

*VA – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm<sup>3</sup>)*

$$PA = \frac{U}{VA} = \frac{VC - C}{VA}$$

*PA* – Productividad del agua (\$/Mm<sup>3</sup>).

*U* – Utilidades de la cosecha (\$).

*VA* – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm<sup>3</sup>).

*VC* – Valor de la cosecha (\$).

*C* – Costo de la cosecha (\$).

#### 5.6.1.2. Eficiencia global del sistema de riego

La eficiencia global de riego es el cociente de dividir el requerimiento de riego entre el volumen total de agua utilizado para la producción del cultivo.

El requerimiento de riego se toman en cuenta dos componentes: el primero es el volumen necesario de agua para el cultivo y, el segundo, es el volumen correspondiente a las aportaciones naturales de agua.

El volumen necesario de agua para producir un cultivo y ayudar a la sustentabilidad de la parcela, incluye el volumen de agua transpirado y evaporado de la superficie de las plantas, el volumen utilizado por las mismas en la formación de sus tejidos, el volumen evaporado directamente del suelo y, por último, el volumen necesario para controlar la concentración de las sales en la solución del suelo.

Las aportaciones naturales de volúmenes de agua que generalmente se presentan durante el desarrollo de los cultivos son: el volumen correspondiente a la lluvia aprovechada, el volumen aportado por el manto freático y el volumen aportado por el rocío. Estos volúmenes de agua aportados en forma natural reducen el volumen requerido de suministro artificial de agua o el volumen requerido de riego por el cultivo.

En resumen, el requerimiento de riego: es el volumen necesario para producir un cultivo, más el volumen necesario para control de sales en el suelo, menos las aportaciones naturales que se presentan durante el ciclo de cultivo.

El volumen total de agua utilizada para riego es la suma de volúmenes de requerimiento de riego, de pérdidas por evaporación e infiltración en el vaso de almacenamiento, de pérdidas por filtración y operación en la red de conducción y, por último, las pérdidas durante la aplicación del agua de riego, incluyendo las pérdidas por arrastre, evaporación y percolación. En riego por aspersión no debe haber pérdidas por escurrimiento; si existen, el diseño o la operación, o ambos, no son los correctos.

Entonces, la eficiencia de riego teórica se puede presentar de la siguiente manera:

$$ER = \frac{V_{tr} + V_{tej} + V_{epys} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf} - V_{ro}}{V_{total}} = \frac{V_{rr}}{V_{total}}$$

*ER – Eficiencia de riego (decimal).*

*V<sub>rr</sub> – Volumen de agua requerido para el riego (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>tr</sub> – Volumen de agua necesario para la transpiración del cultivo (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>epys</sub> – Volumen de agua necesario para la evaporación de las plantas y del suelo (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>tej</sub> – Volumen de agua necesario para la formación de tejidos (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>cs</sub> – Volumen de agua necesario para el control de sales (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>lle</sub> – Volumen de agua aprovechado de la lluvia o lluvia efectiva (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>mf</sub> – Volumen de agua aportado por el manto freático (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>ro</sub> – Volumen de agua aportado por el rocío (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>total</sub> – Volumen de agua total extraído para riego (Mm<sup>3</sup>).*

En la práctica, los volúmenes de agua evaporados directamente de las plantas y del suelo se incluyen en el término de evapotranspiración de agua por el cultivo; los términos correspondientes al volumen de agua que se usa para la formación de tejidos y las aportaciones de rocío se desprecian por ser cantidades pequeñas. Si no hay salinidad y mantos freáticos presentes, la fórmula generalmente se reduce a:

$$ER = \frac{V_{et}}{V_{total}} = \frac{V_{rr}}{V_{total}}$$

*ER – Eficiencia de riego (decimal).*

*V<sub>rr</sub> – Volumen de agua requerido para el riego (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>et</sub> – Volumen de agua de transpiración del cultivo y evaporación de las plantas y del suelo (Mm<sup>3</sup>).*

*V<sub>total</sub> – Volumen total de agua extraído para riego (Mm<sup>3</sup>).*

### 5.6.1.3. Eficiencias parciales

El concepto de eficiencia de riego ha sido usado para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de una parte del sistema. Se han utilizado las eficiencias parciales o componentes siguientes: eficiencia de almacenamiento, eficiencia de conducción y eficiencia de aplicación; estos son factores de la eficiencia global.

En el caso del riego por aspersión, la eficiencia de aplicación incluye las pérdidas por arrastre y evaporación; y las pérdidas por falta de uniformidad de lluvia y de uniformidad de descarga de los aspersores.

### 5.6.1.3.1. Eficiencia de almacenamiento

Hay sistemas de riego que tienen como parte de la obra de aprovechamiento un almacén de agua, que puede ser una presa con vaso de almacenamiento o, también, un estaque construido para almacenamiento y regulación del volumen de agua extraído de un acuífero subterráneo, por medio de un equipo de bombeo de pozo profundo.

La eficiencia de almacenamiento es el cociente de dividir el volumen extraído para riego, entre el volumen que entró al almacenamiento durante el mismo periodo de tiempo. En las presas de almacenamiento debe considerarse el volumen ecológico, el de usos urbanos y otros usos, para repartir las pérdidas por evaporación proporcionales a todos los usos.

$$E_{alm} = \frac{V_{ext}}{V_{talm}}$$

$E_{alm}$  – Eficiencia de almacenamiento (decimal).

$V_{ext}$  – Volumen extraído de la fuente de suministro ( $Mm^3$ ).

$V_{talm}$  – Volumen almacenado útil para riego ( $Mm^3$ ).

### 5.6.1.3.2. Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción es el cociente de dividir el volumen de agua entregado para riego en las parcelas, entre el volumen que entró a la red de conducción durante el mismo periodo de tiempo o que se extrajo de la fuente de suministro.

$$EC = \frac{V_{ent}}{V_{ext}} = \frac{G_{ent}}{G_{ext}}$$

$EC$  – Eficiencia de conducción (decimal).

$V_{ent}$  – Volumen entregado en la parcela ( $Mm^3$ ).

$V_{ext}$  – Volumen extraído de la fuente de suministro ( $Mm^3$ ).

$G_{ent}$  – Gasto entregado en la parcela ( $m^3/s$ ).

$G_{ext}$  – Gasto extraído ( $m^3/s$ ).

### 5.6.1.3.3. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación es el cociente de dividir el volumen de agua requerido de riego por el cultivo, entre el volumen que se entregó en las parcelas durante el mismo periodo de tiempo.

$$E_{apl} = \frac{V_{rr}}{V_{ent}} = \frac{L_{rr}}{L_{ent}}$$

$E_{apl}$  – Eficiencia de aplicación (decimal).

$V_{rr}$  – Volumen requerido de riego ( $Mm^3$ ).

$V_{ent}$  – Volumen entregado en la parcela ( $Mm^3$ ).

$L_{rr}$  – Lámina requerida de riego ( $Mm^3$ ).

$L_{ent}$  – Lámina entregada en la parcela ( $Mm^3$ ).

Esta fórmula tiene variantes en su aplicación debido a las diferentes interpretaciones del requerimiento de riego.

- a) Considerando el caso de que hay necesidad de aplicar un volumen para control de salinidad, se tiene:

$$E_{apl} = \frac{V_{et} + V_{cs}}{V_{ent}}$$

$E_{apl}$  – Eficiencia de aplicación (decimal).

$V_{et}$  – Volumen necesario para la formación de tejidos ( $Mm^3$ ), transpiración del cultivo y evaporación del suelo ( $Mm^3$ ).

$V_{cs}$  – Volumen de control de sales ( $Mm^3$ ).

$V_{ent}$  – Volumen entregado en la parcela ( $Mm^3$ ).

- b) Si además de volumen de control de salinidad hay lluvia efectiva no despreciable y aportación de manto freático, entonces la fórmula queda:

$$E_{apl} = \frac{V_{et} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf}}{V_{ent}}$$

$E_{apl}$  – Eficiencia de aplicación (decimal).

$V_{et}$  – Volumen necesario para la formación de tejidos ( $Mm^3$ ), transpiración del cultivo y evaporación del suelo ( $Mm^3$ ).

$V_{cs}$  – Volumen de control de sales ( $Mm^3$ ).

$V_{lle}$  – Volumen de lluvia efectiva ( $Mm^3$ ).

$V_{mf}$  – Volumen aportado por el manto freático ( $Mm^3$ ).

$V_{ent}$  – Volumen entregado en la parcela ( $Mm^3$ ).

- c) Se pueden presentar variantes del requerimiento de riego y debe ajustarse la fórmula a los componentes necesarios de cada caso.

#### 5.6.1.3.4. Tipos de expresiones de las eficiencias usadas en riego

La eficiencia de riego, en función de las eficiencias parciales, se presenta a continuación:

$$ER = E_{alm} * EC * E_{apl}$$

*ER* – Eficiencia de riego (decimal).

*E<sub>alm</sub>* – Eficiencia de almacenamiento (decimal).

*EC* – Eficiencia de conducción (decimal).

*E<sub>apl</sub>* – Eficiencia de aplicación (decimal).

Donde no hay obra de almacenamiento, como son los sistemas de derivación y aprovechamiento de acuíferos con pozos profundos, la fórmula queda:

$$ER = EC * E_{apl}$$

*ER* – Eficiencia de riego (decimal).

*EC* – Eficiencia de conducción (decimal).

*E<sub>apl</sub>* – Eficiencia de aplicación (decimal).

En la irrigación se han usado láminas de riego por unidad de superficie en lugar de volúmenes, debido a que facilitan el manejo de la información y de las cantidades que se obtienen utilizando menos cifras. Si los volúmenes se dividen por el tiempo de riego, la fórmula queda en función de gastos, y si los volúmenes se dividen entre la superficie regada con el sistema de riego, la eficiencia queda en función de láminas de agua.

$$ER = \frac{V_{et}}{V_{total}} = \frac{G_{et}}{G_{total}} = \frac{L_{rr}}{L_{total}}$$

*ER* – Eficiencia de riego (decimal).

*V<sub>et</sub>* – Volumen necesario para la formación de tejidos ( $Mm^3$ ), transpiración del cultivo y evaporación del suelo ( $Mm^3$ ).

*V<sub>total</sub>* – Volumen total extraído para riego ( $Mm^3$ ).

*G<sub>et</sub>* – Gasto de evapotranspiración ( $Mm^3$ ), transpiración del cultivo y evaporación del suelo ( $m^3/s$ ).

*G<sub>total</sub>* – Gasto total extraído para riego ( $m^3/s$ ).

*L<sub>rr</sub>* – Lámina de requerimiento de riego (cm).

*L<sub>total</sub>* – Lámina total (cm).

#### 5.6.1.4. Pérdidas de agua en el riego por aspersión

Las pérdidas de agua corresponden a las deficiencias parciales del sistema de riego; esto es, a pérdidas en el almacenamiento, pérdidas en la obra de conducción y pérdidas en la aplicación.

En el caso de sistemas de riego por aspersión, se pueden presentar pérdidas en el almacenamiento, en la conducción y en la aplicación. Las primeras pueden ser por evaporación y filtraciones en el almacenamiento; las pérdidas en la conducción pueden ser por filtraciones y fugas y, por último, las pérdidas en la aplicación pueden ser: por falta de uniformidad en la lluvia, por arrastre y evaporación en el trayecto que sigue el agua del aspersor a la superficie del cultivo o del suelo y por falta de uniformidad de distribución hidráulica; no debe haber pérdidas por escurrimiento superficial. Las pérdidas por falta de uniformidad en la lluvia y por falta de uniformidad de distribución hidráulica deben ser las pérdidas por percolación intrínsecas del sistema de riego y puede haber excesos de aplicación que incrementarían la percolación.

$$PA = P_{ull} + P_{aye} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

$PA$  – Pérdidas de agua en el riego por aspersión ( $Mm^3$ ).

$P_{ull}$  – Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia ( $Mm^3$ ).

$P_{aye}$  – Pérdidas por arrastre y evaporación ( $Mm^3$ ).

$P_{udh}$  – Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica ( $Mm^3$ ).

$P_{cond}$  – Pérdidas de agua en la conducción ( $Mm^3$ ).

$P_{alm}$  – Pérdidas de agua en el almacenamiento ( $Mm^3$ ).

**Nota:** si se dividen los volúmenes por el área regada, las pérdidas se expresan en lámina (m).

##### 5.6.1.4.1. Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia

Las pérdidas por uniformidad de lluvia se obtienen con datos de una evaluación del funcionamiento del sistema de aspersión en campo, tomando en cuenta los traslapes de lluvia y obteniendo el coeficiente de variación de la muestra representativa de la zona con gastos menores en los aspersores. A continuación, se presenta la fórmula:

$$P_{ull} = L_{rr} * \left( \frac{CV}{1 - CV} \right)$$

$P_{ull}$  – Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia (m).

$L_{rr}$  – Lámina de requerimiento de riego (m).

$CV$  – Coeficiente de variación de la lluvia de pruebas de aspersión (decimal).

#### 5.6.1.4.2. Pérdidas por arrastre y evaporación

Las pérdidas en la aplicación pueden ser por arrastre y evaporación en el trayecto que recorre el agua desde la boquilla del aspersor hasta la superficie de las plantas o del suelo, como puede observarse en el cuadro 5.12.

**Cuadro 5.12.** Pérdidas por arrastre y evaporación en sistemas de riego por aspersión.

SISTEMA DE RIEGO	PÉRDIDAS (%)
Fijos	8-10
Semifijos y regantes móviles	10-12
Cañones	6-10
Pivote y avance frontal	4-7

Para determinar estas pérdidas es necesario recurrir a las evaluaciones hidráulicas de campo.

$$P_{aye} = \frac{TR * G_{med\ asp}}{A_{asp}} - L_{med\ cap}$$

$P_{aye}$  – Pérdidas por arrastre y evaporación (m).

$TR$  – Tiempo de riego (h).

$G_{med\ asp}$  – Gasto medio de aspersores ( $Mm^3/h$ ).

$A_{asp}$  – Área del aspersor ( $m^2$ ).

$L_{med\ cap}$  – Lámina media captada en los recipientes de la prueba (m).

#### 5.6.1.4.3. Pérdidas por grado de uniformidad de distribución hidráulica

Las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica se obtienen de las pruebas de uniformidad de descarga de los aspersores, con la fórmula siguiente:

$$P_{udh} = L_{media} - L_{med\frac{1}{4}bajo}$$

$P_{udh}$  – Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica ( $Mm^3$ ).

$L_{med}$  – Lámina media (m).

$L_{med\frac{1}{4}bajo}$  – Lámina media del cuarto bajo (m).

#### 5.6.1.4.4. Pérdidas en la conducción

Las pérdidas en la conducción se pueden obtener por diferencia de volúmenes, considerando el extraído para riego y restándole el entregado para riego en la parcela.

$$P_c = V_{ext} - V_{ent}$$

$P_c$  – Pérdidas por conducción ( $Mm^3$ ).

$V_{ext}$  – Volumen extraído ( $m^3$ ).

$V_{ent}$  – Volumen entregado ( $m^3$ ).

#### 5.6.1.4.5. Pérdidas en el vaso

Cuando hay un vaso de almacenamiento que no tiene impermeabilización, se considera que tiene pérdidas por filtraciones y evaporación. En este caso se requiere analizar el funcionamiento del vaso, tomando en cuenta las entradas y salidas de agua. Generalmente se conocen datos mensuales de las entradas por río, lluvia y bombeo; las salidas por extracción y evaporación se pueden medir y estimar, y las filtraciones se calculan como pérdidas deducidas.

Se utiliza la ecuación siguiente:

$$P_{alm} = V_{ev} + V_{inf}$$

$P_{alm}$  – Pérdidas de agua en el almacenamiento ( $Mm^3$ ).

$V_{ev}$  – Volumen evaporado en el almacenamiento ( $Mm^3$ ).

$V_{inf}$  – Volumen infiltrado en el almacenamiento ( $Mm^3$ ).

$$V_{inf} = V_b + V_{ll} - V_{ext} - V_{ev}$$

$V_{inf}$  – Volumen infiltrado en el almacenamiento ( $Mm^3$ ).

$V_b$  – Volumen bombeado o entradas por escurrimiento en el vaso ( $m^3$ ).

$V_{ll}$  – Volumen llovido ( $m^3$ ).

$V_{ext}$  – Volumen extraído ( $m^3$ ).

$V_{ev}$  – Volumen evaporado ( $m^3$ ).

## 5.6.2. Evaluación hidráulica

### 5.6.2.1. Bases de hidráulica para lograr la uniformidad

La evaluación hidráulica de un sistema de riego por aspersión es un trabajo por medio del que se puede conocer si el proyecto, instalación, operación y conservación se han hecho correctamente. El objetivo del buen desempeño del sistema de riego por aspersión es aplicar el agua de riego satisfaciendo las necesidades de agua y nutrientes de los cultivos para la producción de altos rendimientos y con productos de calidad, con las pérdidas de volúmenes de agua implícitas en la alta eficiencia de riego y con contaminación mínima.

Para lograr buenas eficiencias de riego con alta uniformidad de aplicación, se requiere conocer los principios básicos de funcionamiento hidráulico del sistema de riego desde el equipo de bombeo hasta las tuberías regantes con aspersores.

#### 5.6.2.1.1. Presiones y gastos de operación del sistema

Si se tiene la información correcta sobre los gastos y presiones de operación de un sistema de riego es muy simple organizar el plan de la evaluación y ejecutarlo, puesto que se tienen las condiciones en las que debe operar el sistema de riego por aspersión, en el cabezal de control, en las secciones de riego, en la tubería principal o en las entradas de agua a las tuberías regantes y en los aspersores en posiciones estratégicas del sistema.

En este caso, las medidas de corrección son muy simples porque los gastos y las presiones son biunívocos entre sí; es decir, hay sólo una correspondencia, por lo que si difieren los datos de operación con los de proyecto, únicamente hay que hacer los ajustes necesarios para que los gastos o las presiones correspondan a los indicados en las reglas de operación del sistema de riego para asegurar que opere en condiciones adecuadas para riego. Con este ajuste, se logra que el sistema funcione bien y nada más falta asegurar que se opere correctamente.

Para lograr lo anterior, es necesario conocer la lámina mínima de riego por hora que se aplica en la sección de riego, con la finalidad de determinar los tiempos de riego requeridos para aplicar la lámina de riego en esa sección. En la lámina por aplicar con el sistema de riego debe incluirse la lámina que se estima se perderá por arrastre y evaporación.

Para hacer los ajustes en la cuantificación de las láminas de riego que deben aplicarse a nivel de aspersores críticos (los de gasto mínimo), se requiere realizar trabajos de

determinación de pérdidas de agua por arrastre y evaporación debidas al viento. Es importante hacer notar que el objetivo es regar **sin tener déficits en la superficie del sistema de riego**.

En la aplicación de este método de evaluación es muy importante tener las especificaciones técnicas del sistema de riego y del aspersor relativas a los gastos y presiones de operación, además de las presiones de operación y gastos de cada sección de riego.

Asimismo, es importante señalar que es más fácil medir presiones que gastos. Por ello es conveniente tener manómetros calibrados y confiables para usar el método de las presiones. Si no se cuenta con manómetros calibrados, es mejor aforar en la descarga de los aspersores.

Además de las presiones, la revisión por observación directa del funcionamiento del sistema tiene indicadores que pueden ser muy útiles, como el traslape que se presenta entre aspersores y entre tuberías regantes, porque si la lluvia de un aspersor alcanza el aspersor vecino o el radio de mojado es igual o mayor que el espaciamiento entre aspersores y entre regantes, se puede considerar que la uniformidad del riego es aceptable.

Cuando la presión es insuficiente en el aspersor, generalmente se reduce el radio de mojado y aumenta el tamaño de gota y, cuando es excesiva, el radio se incrementa un poco y tiende a reducirse el tamaño de gota.

#### 5.6.2.1.2. Rango de gasto o presión de operación de aspersores

Mide la amplitud de los valores de la muestra y se calcula por la diferencia entre el valor más grande y el valor más pequeño del gasto o de la presión de operación de los aspersores. Entre menor sea el rango, mayor es la uniformidad de aplicación. Este criterio no aplica a pivotes centrales debido a que en estos sistemas de riego el gasto de los aspersores en la tubería regante debe ser mayor conforme se aleja su posición del centro del pivote.

Si la diferencia de valores del gasto hidráulico de dos emisores en una sección o en un sistema de riego son los valores extremos del conjunto, entonces corresponden a los límites del rango.

A mediados del siglo pasado se consideró, con fines de cálculo hidráulico de tuberías con salidas múltiples, que si en una tubería la diferencia de descargas de las salidas no superaba el 10% del gasto del último emisor, en la práctica se podía considerar que las descargas eran iguales. También, desde el enfoque agronómico, se obtuvo la conclusión

siguiente: si el rango de gastos es el 10% de la descarga del último emisor en una tubería regante, en una sección o en un sistema de riego, la uniformidad de emisión es alta y favorece al cultivo; esto se demuestra de la manera siguiente:

Se considera una sección de riego fija o una tubería regante a nivel, y que el diseño de la sección de riego o de la tubería regante plantea que la diferencia de descargas entre el primer y último emisor de la sección o, en su caso, de la tubería regante, correspondan con el 10% del gasto del último aspersor.

$$\text{Diferencia de gasto} = G_p - G_u = 0.10 * G_u$$

$$\text{Entonces: } G_p = 1.10 * G_u$$

Si se considera la media geométrica de los dos valores, se tiene que:  $G_m = (G_p * G_u)^{0.5}$

$$\text{Simplificando: } G_m = (1.10 * G_u * G_u)^{0.5} = 1.0488 * G_u$$

Si definimos la eficiencia de distribución hidráulica como:

$$E_d = \frac{G_u}{G_m} * 100$$

Entonces, para cualquier valor del gasto del último emisor se tiene que:

$$E_d = \frac{G_u}{G_m} * 100 = \frac{G_u}{1.0488 * G_u} * 100 = 95.35 \%$$

Por lo tanto, la eficiencia de distribución hidráulica es alta (95.35%) y la uniformidad de emisión de los aspersores beneficia a los cultivos.

También es útil usar el rango de presiones, por lo que se presenta a continuación:

Para la misma diferencia de gastos, se tiene que:  $G_u = K * H_u^{0.5}$  y que:

$$G_p = K * H_p^{0.5} = 1.10 * G_u = 1.10 * K * H_u^{0.5}$$

Entonces:

$$H_p^{0.5} = 1.10 * H_u^{0.5}$$

Elevando al cuadrado los miembros de la ecuación, se tiene que:

$$H_p = 1.21 * H_u$$

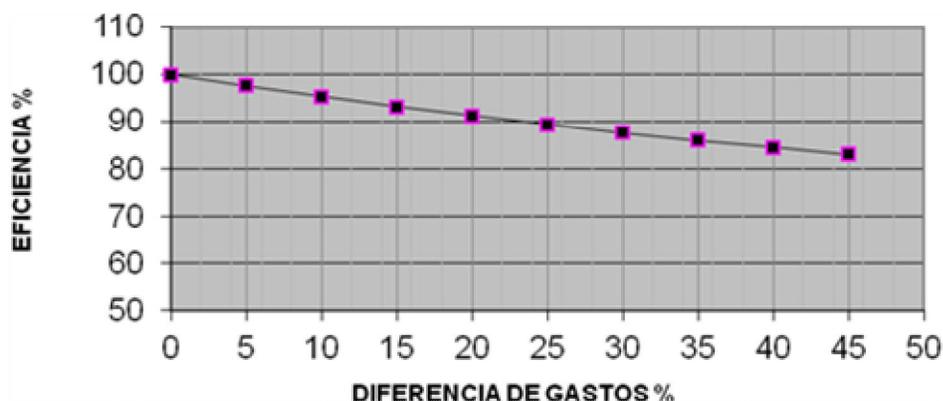
y, por último:

$$H_p - H_u = 0.21 * H_u$$

Por lo que, la diferencia de presión máxima aceptable entre dos emisores de una sección o del sistema de riego, no debe ser mayor del 21% de la presión de operación del último emisor, para que se sostenga el rango de variación del 10% de los gastos de los aspersores y se obtenga buena uniformidad hidráulica en el riego, como se observa en el cuadro 5.13.

**Cuadro 5.13.** Relación entre gastos y presiones de emisores, con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.

DIFERENCIA DE GASTOS %	EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA %	DIFERENCIA DE PRESIÓN %
0	100.00	00
5	97.59	10
10	95.35	21
15	93.25	32
20	91.29	44
25	89.44	56



**Ilustración 5.54.** Relación entre gastos y presiones de emisores con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.

Del análisis del funcionamiento de una tubería, se concluye que el rango de gastos es mejor indicador de variación que la eficiencia de distribución hidráulica, porque explica mejor la variación de láminas de riego. Se considera que la diferencia máxima permisible

de descargas entre el aspersor de mínimo gasto y el de máximo gasto debe ser 10%; por lo tanto, si es mayor, se nota que está fuera de rango aceptable.

La eficiencia de distribución hidráulica es engañosa porque, a pesar de que haya una diferencia de descargas del orden de 30% en los aspersores, el valor de la eficiencia de distribución hidráulica es de 87.7%. Esta última no da idea clara del desperdicio de agua. Por esta razón, se aceptó de manera general la diferencia máxima del 10% en los gastos de los emisores en la tubería regante y en el sistema de riego, desde mediados del siglo pasado.

Al evaluar un sistema de riego por aspersión, midiendo las descargas de los emisores más y menos favorecidos por la presión de la sección o de la tubería regante, si se obtiene que la diferencia de gastos es menor que 10% del gasto del último emisor, o la diferencia de presiones de operación en los emisores críticos es menor que 21% de la presión de operación del último aspersor, se considera que la uniformidad es buena.

En el caso de los sistemas de riego de los pivotes centrales, los gastos o descargas de los aspersores no sirven para calcular la uniformidad de emisión porque están seleccionados con diferencias específicas para regar uniformemente, de acuerdo con su posición en la tubería regante. Para calcular la uniformidad de riego en los pivotes, deben utilizarse las láminas de riego que aplica el equipo a lo largo de la tubería y no deben exceder del 10% de la lámina de riego de la lámina menor obtenida.

#### 5.6.2.1.3. Análisis del funcionamiento de una tubería con aspersores

Para analizar el funcionamiento hidráulico de una tubería regante, se procedió a simular su funcionamiento. Para desarrollar el trabajo, se consideró la información siguiente:

Número de aspersores en la tubería = 26.

Ecuación carga-gasto del aspersor:

$$Q = 0.14 * H^{0.5}$$

Donde:

$Q$  – Gasto del aspersor (l/s).

$K$  – Constante ( $cm^4/s/kg^{0.5}$ )

$H$  – Presión de operación del aspersor ( $kg/cm^2$ ).

$x$  – Exponente del aspersor.

Datos del último aspersor: gasto = 0.250 l/s, operando con presión = 3.19  $kg/cm^2$ .

Fórmula de Manning. Coeficiente de fricción  $C=0.009$ .

Tubería a nivel. Diámetro interior = 75 mm. Longitud del tramo = 9 m.

**Procedimiento:** 1) Se calculó la pérdida de carga en el último tramo de tubería, considerando la posición del último aspersor al final de la tubería, por lo que se usó el gasto del último aspersor como gasto del tramo de tubo. 2) Se determinó la presión de operación del penúltimo aspersor, sumando la presión de operación del último aspersor con las pérdidas de carga del último tramo de tubería. 3) Luego, se sumó el gasto del último tramo, con el gasto del penúltimo aspersor, para calcular las pérdidas de carga en el penúltimo tramo. 4) Luego, se calculó paso a paso la presión de operación de cada aspersor para cada tramo de la tubería, tomando la presión y el gasto de operación del tramo anterior, más las pérdidas de carga en el tramo, calculadas con el gasto del tramo anterior más el gasto del último aspersor calculado.

Siguiendo el procedimiento, se obtuvieron los datos del cuadro 5.14., correspondientes a los gastos y presiones de cada aspersor de la tubería.

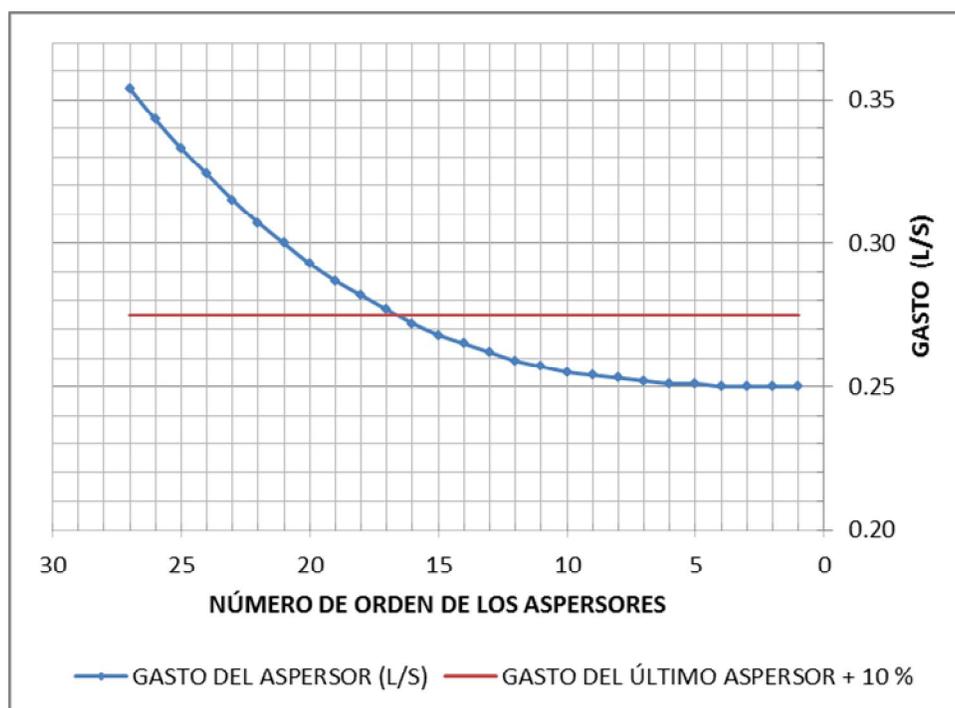
Se graficaron los datos y se presentan en la Ilustración 5.55., donde se observa que si se quiere que el gasto de los emisores no rebase el 10% de la descarga del último aspersor, se debe operar con 16 aspersores en la tubería a nivel; si la tubería estuviera de subida serían menos y si estuviera de bajada, serían más.

Si se quisiera operar sin rebasar el 20% de diferencia máxima de descargas, se debería operar con 21 aspersores. Esto implica que aumenta sólo con cinco aspersores y duplica la descarga del emisor. Si se quiere operar con 30% de diferencia máxima de gastos, se incrementan otros tres aspersores y, por último, si opera con máximo permisible con 40% de diferencia de descargas, aumenta dos aspersores, porque con tres rebasa el gasto permisible. Esto puede observarse en el cuadro 5.14. o en la Ilustración 5.55.

**Cuadro 5.14.** Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.

Núm. ORDEN	Q L/S	Núm. ORDEN	Q l/s
1	0.250	15	0.268
2	0.250	16	0.272
3	0.250	17	0.277
4	0.250	18	0.282
5	0.251	19	0.287
6	0.251	20	0.293
7	0.252	21	0.300
8	0.253	22	0.307
9	0.254	23	0.315
10	0.255	24	0.324
11	0.257	25	0.333
12	0.259	26	0.343
13	0.262	27	0.354
14	0.265		

Para analizar los datos como láminas de riego para interpretar desde el punto de vista de riego, se presentan en el cuadro 5.15. los volúmenes y láminas que se generan a partir de los gastos de los aspersores, considerando un tiempo de seis horas de operación y la superficie de riego por aspersor de 108 m<sup>2</sup>. Al analizar la variación de gastos, volúmenes, láminas de riego y presiones de operación, se observa que los valores tienen incrementos numéricos significativos a partir de 10% de diferencia de gastos y gráficamente queda evidente.



**Ilustración 5.55.** Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.

Los volúmenes y las láminas de riego emitidas por los aspersores corresponden a la misma diferencia que los gastos en porcentaje, puesto que los volúmenes son los gastos multiplicados por el tiempo de operación y las diferencias de láminas de riego también, debido a que son los volúmenes divididos entre la superficie de influencia de un aspersor.

Las láminas medias aplicadas con diferentes longitudes de tubería regante, se calcularon para todas las longitudes desde dos hasta 27 aspersores, y aparecen en la columna de LRM (lámina de riego media) del cuadro 5.15. Para 16 aspersores, la lámina bruta media fue 5.12 cm y correspondió a una eficiencia de distribución hidráulica de 97.64 por ciento.

Aun para la diferencia aproximada de 40% en gastos, se presenta una lámina bruta media de 5.507 cm. Esto significa que la lámina media excede en 10%, aproximadamente, a la lámina necesaria de proyecto de 5 cm, y la eficiencia de distribución hidráulica calculada

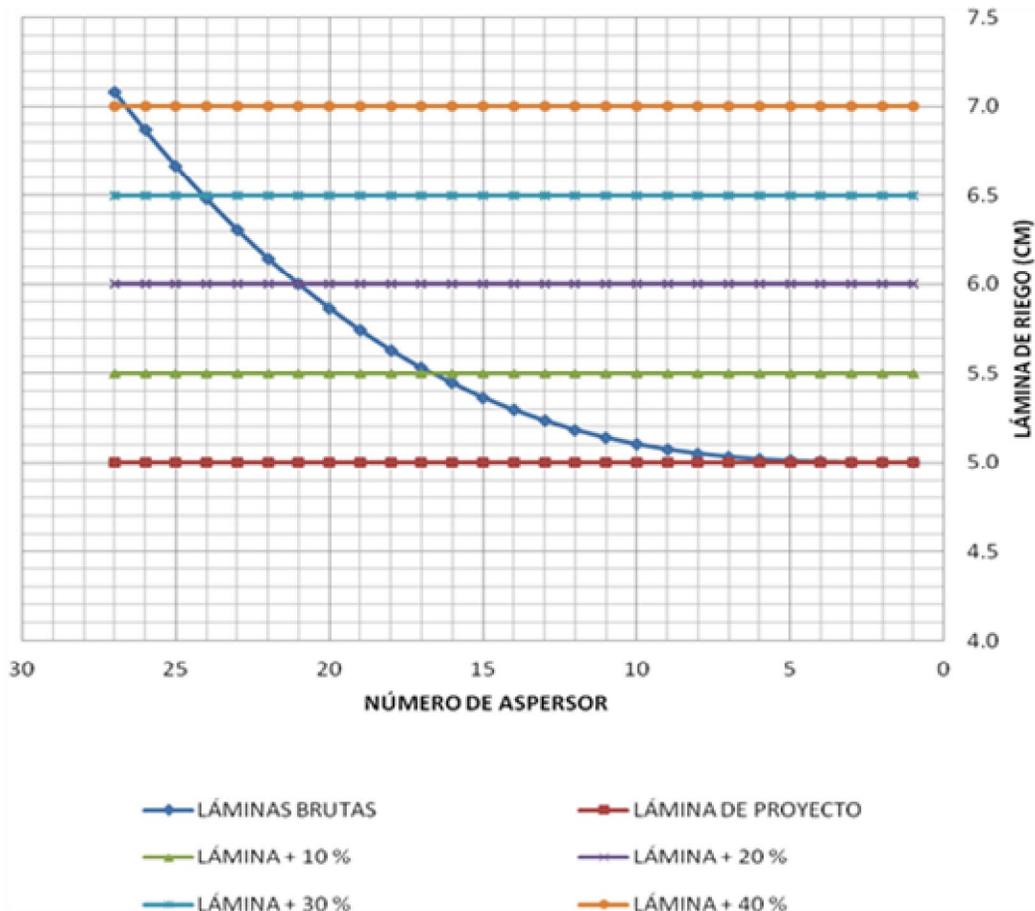
fue de 90.79%. Esto significa que la mayoría de los aspersores aplica láminas de riego brutas menores que la media y, por eso, se sostiene alto el valor numérico de la eficiencia de distribución hidráulica. En el caso de aplicar fertilizantes por medio del sistema de riego, sólo en pocos aspersores se aplicaría el exceso fuerte de fertilizante.

**Cuadro 5.15.** Gastos, volúmenes y láminas de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y eficiencias hidráulicas de distribución.

N	Q L/S	H K/CM2	HF M	VOL. ASP M3	LRB CM	LRM CM	EDH %
1	0.25	3.189	0	5.4	5		
2	0.25	3.189	0.002	5.4	5	5.000	100.00
3	0.25	3.191	0.004	5.4	5	5.000	100.00
4	0.25	3.195	0.007	5.41	5.01	5.003	99.95
5	0.251	3.203	0.012	5.41	5.01	5.004	99.92
6	0.251	3.214	0.017	5.42	5.02	5.007	99.87
7	0.252	3.231	0.023	5.44	5.03	5.010	99.80
8	0.253	3.254	0.03	5.45	5.05	5.015	99.70
9	0.254	3.284	0.038	5.48	5.07	5.021	99.58
10	0.255	3.322	0.047	5.51	5.1	5.029	99.42
11	0.257	3.369	0.057	5.55	5.14	5.039	99.22
12	0.259	3.426	0.068	5.6	5.18	5.051	98.99
13	0.262	3.494	0.081	5.65	5.23	5.065	98.72
14	0.265	3.575	0.094	5.72	5.29	5.081	98.41
15	0.268	3.669	0.109	5.79	5.36	5.099	98.05
16	0.272	3.778	0.125	5.88	5.44	5.121	97.64
17	0.277	3.903	0.142	5.97	5.53	5.145	97.19
18	0.282	4.045	0.161	6.08	5.63	5.172	96.68
19	0.287	4.207	0.182	6.2	5.74	5.202	96.12
20	0.293	4.388	0.204	6.33	5.87	5.235	95.51
21	0.3	4.592	0.228	6.48	6.00	5.271	94.85
22	0.307	4.82	0.254	6.64	6.15	5.311	94.14
23	0.315	5.074	0.282	6.81	6.31	5.355	93.37
24	0.324	5.357	0.313	7	6.48	5.402	92.56
25	0.333	5.669	0.346	7.2	6.67	5.452	91.70
26	0.343	6.015	0.381	7.42	6.87	5.507	90.79
27	0.354	6.396	0.42	7.64	7.08	5.565	89.84

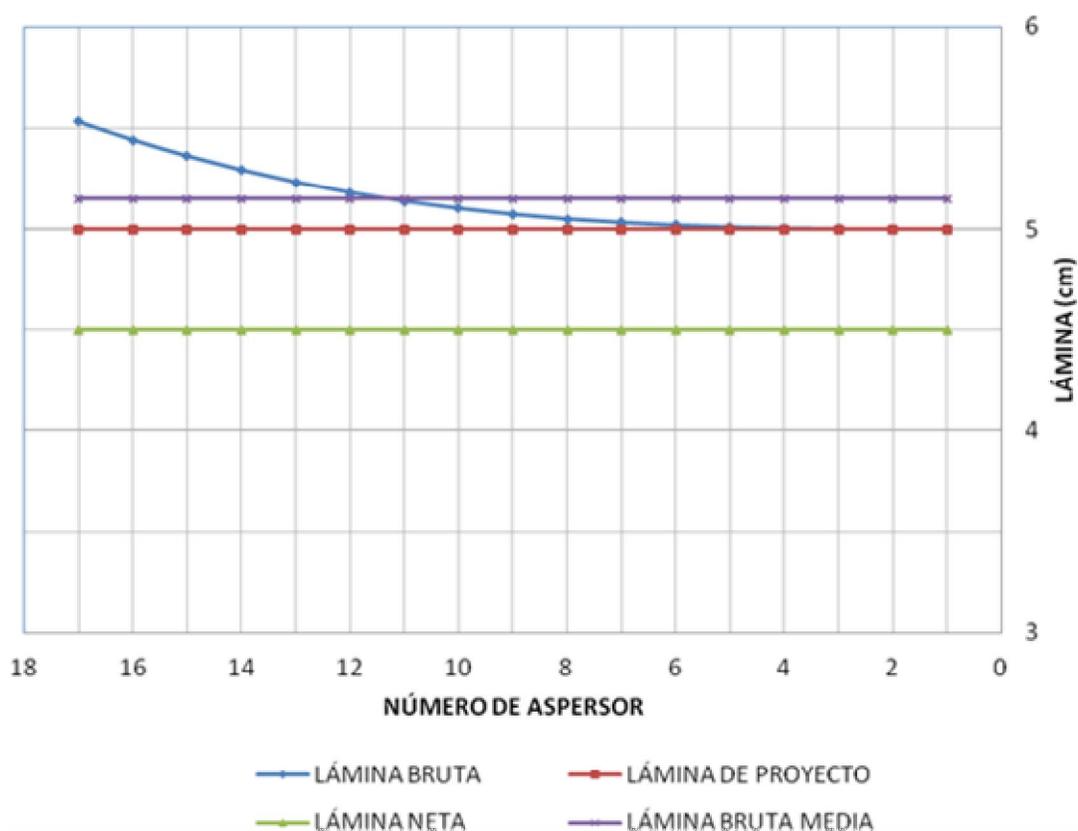
Sin embargo, en la Ilustración 5.56. se observan con mayor facilidad las diferencias de láminas de riego: el aspersor 17 aplica el 11% del primero, el número 21 aplica el 20%, el número 24 aplica el 30% y el número 27 aplica un poco más del 40%. Esto implica que en costos de operación y uniformidad de aplicación, a partir de diferencias mayores al 10%, se incrementa rápidamente el costo de la energía para operar la tubería regante, porque para generar la diferencia de 40% en el rango de descargas de los aspersores debe incrementarse la presión de operación en 96 por ciento.

Por lo anterior, los riegos no deben proyectarse con la lámina media que aplica la tubería, porque la mayoría de los aspersores aplicaría menos que la media y el riego sería deficiente. Esto implica que los excedentes de lámina de riego son pérdidas de agua necesarias para regar bien el cultivo.



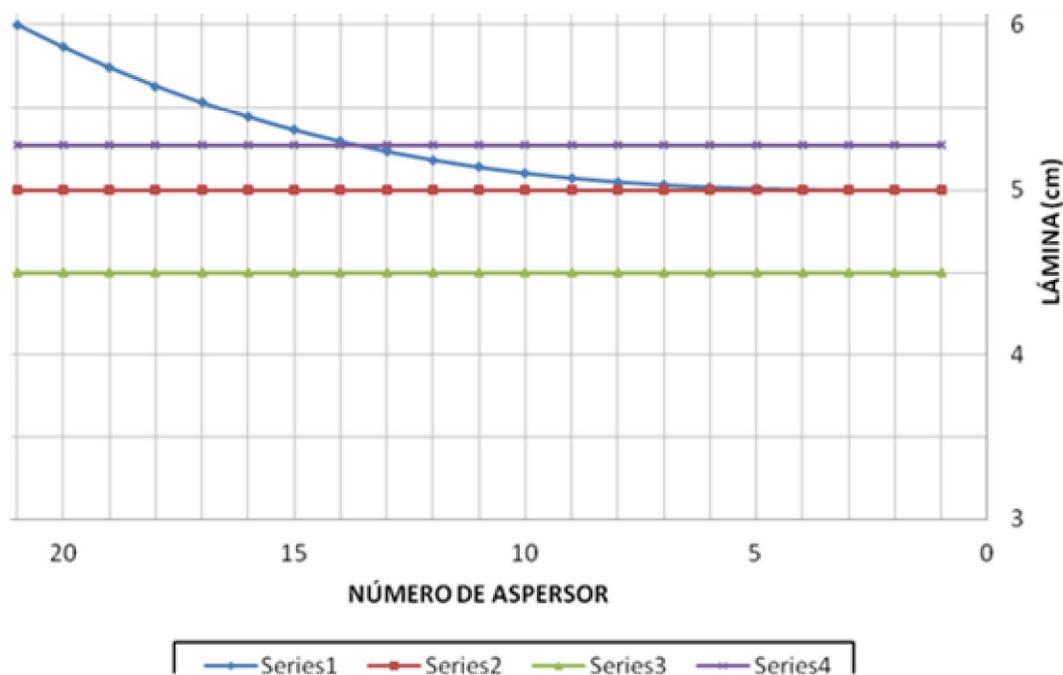
**Ilustración 5.56.** Láminas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y los incrementos cada 10%.

Considerando las pérdidas por arrastre y evaporación, se analiza la eficiencia de aplicación, suponiendo que la lámina de requerimiento de riego o lámina neta es de 4.5 cm. La eficiencia de aplicación del riego, obtenida con simulación con la tubería regante utilizando 17 aspersores, para obtener el rango de gastos igual a 10%, y se consideraron pérdidas de agua por arrastre y evaporación de 0.5 cm de lámina, por lo que se proyectó aplicar una lámina de 5 cm, con el aspersor de menor gasto. Luego entonces, tomando en cuenta el funcionamiento hidráulico de la tubería analizada anteriormente, resultó aplicar una lámina bruta media de 5.15 cm y, por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 87.34%. En la Ilustración 5.57. se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.



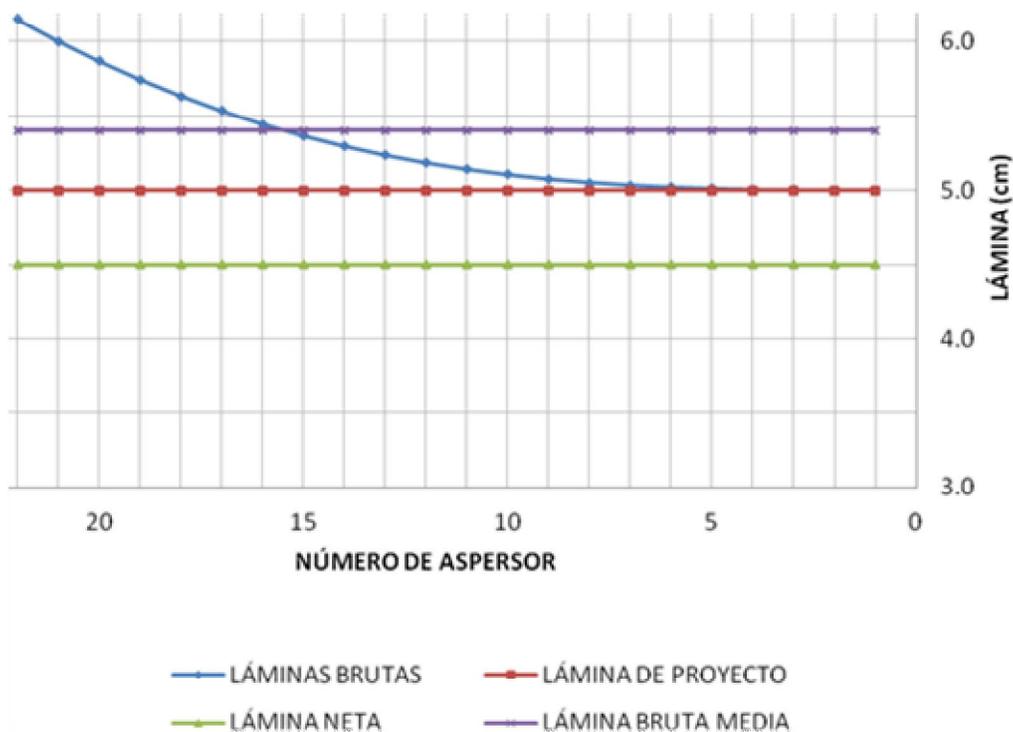
**Ilustración 5.57.** Láminas brutas aplicadas por los aspersores de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 10%.

Ahora, simulando con la tubería de 21 aspersores y las condiciones de láminas neta, pérdidas por arrastre y evaporación, se obtiene el rango de gastos igual a 20%, y resulta la lámina bruta media de 5.27 cm. Así, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 85.34%. En la Ilustración 5.58. se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.



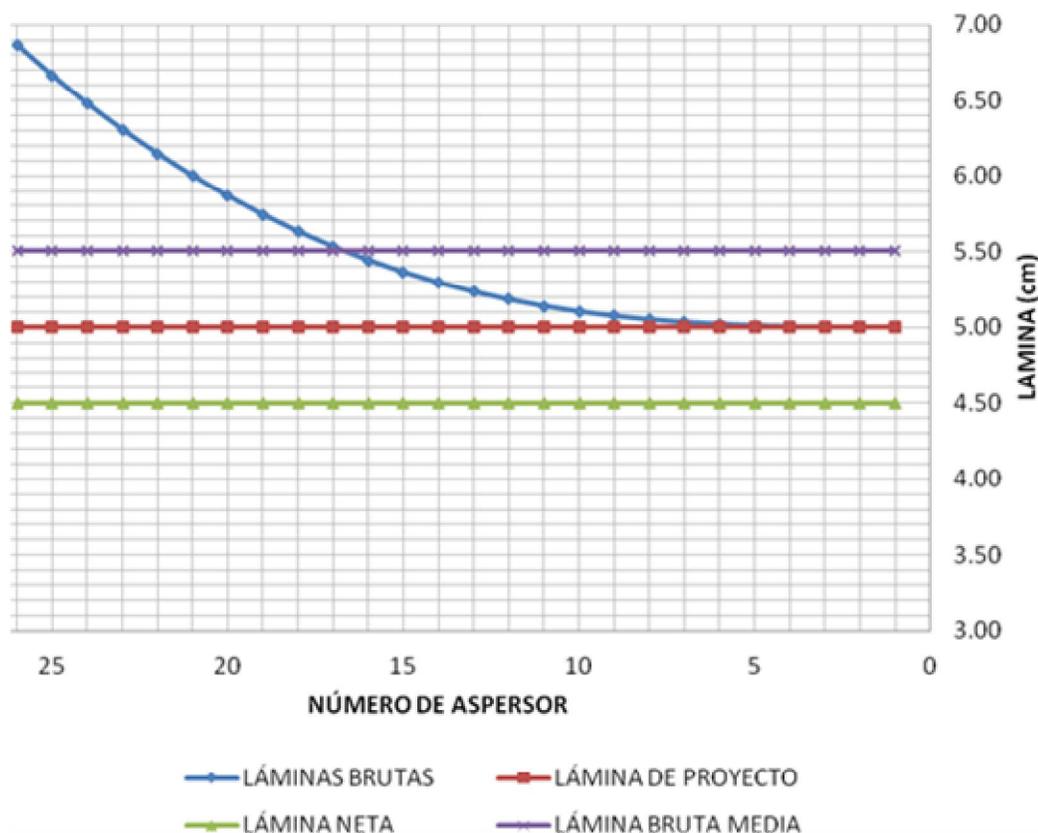
**Ilustración 5.18.** Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 20%.

Ahora, considerando que se utiliza la variante de tubería con 24 aspersores, se obtiene diferencia de gastos igual a 30%, y se requiere aplicar una lámina bruta media de 5.40 cm. Por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 83.33%. En la Ilustración 5.59. se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.



**Ilustración 5.59.** Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 30%.

Ahora, considerando que se utiliza la variante de tubería con 26 aspersores, se obtiene diferencia de gastos igual a 40% y se requiere aplicar una lámina bruta media de 5.51 cm. Por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 83.33%. En la Ilustración 5.60. se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.



**Ilustración 5.60.** Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 40%.

Como resultado del análisis del funcionamiento hidráulico de la tubería, se concluye que:

**Primero.** Debe considerarse el requerimiento de riego como lámina neta.

**Segundo.** Se deben incluir las pérdidas por arrastre y evaporación, para calcular la lámina de riego que debe suministrarse con el último aspersor o con el aspersor de mínima descarga de la tubería regante.

**Tercero.** Debe considerarse el cálculo de la lámina promedio de la tubería regante, tomando en cuenta las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica.

**Cuarto.** Es importante seguir la recomendación de que la diferencia máxima de descargas de los aspersores no exceda el 10% de la descarga del último emisor o de mínima presión de operación.

**Quinto.** Debe agregarse una lámina de compensación por falta de uniformidad de lluvia (como se muestra en el funcionamiento de aspersores o de una tubería regante).

#### 5.6.2.2. Evaluación de los sistemas de riego

Con la finalidad de obtener el grado de desempeño de un sistema de riego por aspersión y las acciones que puedan realizarse para mejorarlo físicamente o mejorar su operación, se han usado parámetros indicadores de tres clases: a) el rango de presiones y gastos de operación, b) la uniformidad de la distribución hidráulica del agua generada por las descargas en el sistema de riego y c) la uniformidad con que se distribuye la lluvia artificial en el campo.

##### 5.6.2.2.1. Factores que afectan la uniformidad de riego del sistema

A continuación, se presentan algunos de los factores que pueden influir en la uniformidad de riego que se genera durante la operación del sistema que aplica el agua.

**Posición de los aspersores.** La posición relativa de los aspersores en el sistema de riego puede generar ventajas para recibir más presión que otros y descargar más agua, o estar desfavorecidos y recibir menos presión y descargar menos agua; esto puede ser originado por las pérdidas de energía hidráulica en la red de tuberías o por los desniveles del terreno.

Como en los sistemas de riego fijos no cambian las posiciones de las tuberías de riego, las fallas en la uniformidad de la descarga de los aspersores se repiten en cada riego y pueden generar excesos o déficits de agua en el cultivo.

Generalmente, para contrarrestar este problema, se aplican láminas de riego más grandes que las necesarias para evitar que haya zonas con déficit de riego. En los sistemas móviles tiende a distribuirse la no uniformidad en el campo, conforme se cambian las posiciones de los aspersores y se minimiza el efecto que produciría sobre el cultivo. Baja la eficiencia de riego y asegura la producción.

**Variación de topografía.** La variación de gastos o no uniformidad del riego puede generarse en diferentes posiciones en el campo, principalmente como efecto de cambios en elevaciones del terreno o ubicación del aspersor en la sección o tubería regante. A mayores alturas relativas del aspersor, tendrá menor presión de posición y a menores alturas relativas del aspersor, tendrá mayor presión de posición, y la descarga es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de operación.

Variación de la presión en las tuberías regantes y en los aspersores. Se presentan diferencias de gastos en los emisores por las diferencias de presiones hidráulicas que se generan en el funcionamiento de tuberías con salidas múltiples, por las pérdidas de energía o por la variación topográfica. A mayor presión mayor descarga y a menor presión menor descarga.

Presión de operación de las boquillas. Cuando las boquillas de los aspersores trabajan a presiones altas generan gotas pequeñas, y cuando la descarga o chorro sale con ángulo alto, se arrastran más fácilmente fuera de la zona de aplicación, bajando la uniformidad de la lluvia y se pueden presentar pérdidas por arrastre y evaporación mayores.

Cuando las presiones de operación son bajas, el tamaño de la gota es más grande y puede compactar el suelo y reducir la infiltración, o puede dañar las flores de algunos cultivos, por ejemplo el frijol. Con presión baja se reduce el radio de mojado.

Velocidad del viento. La velocidad del viento puede ser el principal factor de pérdidas por arrastre y evaporación, y al generar el arrastre de las gotas de agua tiende a reducir la uniformidad de la lluvia.

En algunos casos, se reduce un poco la presión de operación de los aspersores para generar gotas relativamente grandes, con la finalidad de contrarrestar el arrastre por el viento y la evaporación.

#### 5.6.2.2.2. Evaluación del sistema con presiones y gastos de operación

Con la finalidad de conocer si un sistema de riego por aspersión fijo o de movimiento intermitente se opera hidráulicamente bien, es conveniente utilizar el método de presiones y gastos de operación. Es el método más simple y práctico para supervisar la operación del sistema de riego.

Con la información del sistema de riego sobre los gastos y presiones de operación que se incluyen en la guía de operación, o en el expediente del proyecto, es muy simple organizar el plan de la evaluación, ejecutarlo y aplicar acciones de mejora en caso de ser necesario, debido a que se conocen las condiciones en las que debe operar correctamente. Para aplicar este método, es muy importante tener las especificaciones técnicas del aspersor sobre los gastos y sus presiones de operación.

Para aplicar el método de las presiones es indispensable tener manómetros calibrados o un manómetro calibrado de referencia para comparar con los que se usarán en campo. Es más fácil medir presiones que aforar gastos en aspersores; además, es más económico conseguir manómetros que medidores de flujo.

Para evaluar un sistema de riego por aspersión se debe conocer si el equipo de bombeo está funcionando correctamente. Primero, se revisa la presión de operación del manómetro en el tubo a la salida de la bomba y también el gasto indicado en el medidor de flujo. Si están en el rango permisible, se considera que el equipo de bombeo trabaja correctamente.

Si el sistema sólo tiene medidor de presión, es conveniente utilizar la curva carga gasto del equipo de bombeo, que permite saber cuál es el gasto de operación al conocer la presión de trabajo de la bomba (esta relación biunívoca hace confiable el método). En el caso de que no se tenga la relación carga gasto, se necesita aforar los aspersores que operan simultáneamente o un muestreo representativo para obtener el gasto medio de los aspersores, para estimar el gasto del sistema de riego y verificar si corresponde con el del proyecto.

**Evaluación del sistema por secciones de riego.** Cuando se requiere obtener indicadores del desempeño de un sistema de riego con secciones de riego, se verifican y anotan las presiones y gastos de operación por sección, se comparan con los datos de proyecto y se verifica si cumplen. Si no cumplen, se hacen los ajustes en las válvulas de control para corregir las presiones de operación y se procede a verificar los gastos.

Cuando se requiere evaluar un sistema de riego con secciones de riego con superficies diferentes, para representar las condiciones medias de operación, el gasto o la presión medidos en cada sección, deberán ponderarse por la superficie para calcular la media de los parámetros:

$$Q_{\text{med}} = \frac{Q_1 * A_1 + Q_2 * A_2 + \dots + Q_n * A_n}{A_{\text{total}}}$$

$$P_{\text{med}} = \frac{P_1 * A_1 + P_2 * A_2 + \dots + P_n * A_n}{A_{\text{total}}}$$

Donde:

$Q_{\text{med}}$  – Gasto medio (l/s).

$Q_i$  – Gastos de las secciones (l/s).

$A_i$  – Área de las secciones (ha).

$P_{\text{med}}$  – Presión media (kg/cm<sup>2</sup>).

$P_i$  – Presión de las secciones.

Evaluación de un sistema con medidor en el cabezal de control y manómetros. En la mayoría de los casos, sólo se cuenta con medidor y manómetros en el cabezal de control. En estas condiciones se requiere verificar presiones y gastos en diferentes partes del sistema de riego, por el procedimiento del manómetro con tubo de Pitot y con aforos directos en los aspersores de las tuberías regantes.

Para obtener el gasto medio de la sección o de la tubería regante, se recomienda medir presiones (en el caso de tener la ecuación del aspersor) o aforar de 9 a 16 aspersores distribuidos de manera que permitan representar toda la sección o la tubería regante que se analiza.

Basándose en la guía de operación del sistema de riego, se prepara un croquis del sistema de riego con los puntos de control (unidades de control de presión y gasto) y una libreta de registros. En una hoja de ésta, se anotan las presiones y gastos indicados para la operación normal del sistema de riego en el cabezal de control y en cada unidad de control autónoma de las secciones de riego. Se dejan columnas al lado para registrar las presiones y gastos medidos en cada punto durante los trabajos de campo en la evaluación. Con los resultados, se realizan los ajustes para corregir las diferencias de presión y gasto encontrados.

Con la finalidad de determinar las láminas aplicadas al cultivo y calcular la eficiencia de aplicación, se requiere determinar las pérdidas de agua por evaporación y arrastre del viento, para hacer correcciones adicionando éstas en la cuantificación de las láminas de riego que deben aplicarse a nivel de aspersores críticos (los de gasto mínimo).

Comparación del gasto de proyecto con la descarga medida. La diferencia de gastos encontrada entre la medida en la descarga del equipo de bombeo y la de proyecto o diseño, debe ser máximo de 5% del gasto de diseño del equipo de bombeo (rango de diferencia permisible), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$DP_{med} = \frac{G_{proy} - G_{med}}{G_{proy}} \leq 0.05$$

Donde:

$DP_{med}$  – Diferencia de gasto máxima permisible entre la descarga de la bomba y el gasto de proyecto ( $m^3/s$ ).

$G_{proy}$  – Gasto de proyecto ( $m^3/s$ ).

$G_{med}$  – Gasto medido en la descarga de la bomba ( $m^3/s$ ).

Con la diferencia de gastos deberá hacerse el ajuste del tiempo de riego para cada sección. Si es positivo, debe aumentarse el tiempo de riego y, si es negativo, debe reducirse con la finalidad de compensar la diferencia de volúmenes. Debe comprobarse que no haya fugas que originen mayor descarga en la bomba con menor presión.

La diferencia entre el gasto mínimo y el máximo en una sección de riego o, en su caso, en una tubería regante, no debe ser mayor de 12% y se expresa de la siguiente forma:

$$DG_{max} = \frac{G_{m\acute{a}x} - G_{m\acute{i}n}}{G_{m\acute{i}n}} \leq 0.12$$

Donde:

$DG_{m\acute{a}x}$  – Diferencia de gasto máxima entre la descarga del emisor de mayor gasto y el gasto del aspersor de gasto mínimo ( $m^3/s$ ).

$G_{m\acute{a}x}$  – Gasto máximo de emisores ( $m^3/s$ ).

$G_{med}$  – Gasto mínimo de aspersores ( $m^3/s$ ).

En el caso de los sistemas de riego de movimiento continuo como cañón viajero, pivote y lateral móvil, se deben utilizar láminas de riego:

Para la lámina en sistemas de movimiento continuo, la ecuación anterior cambia a:

$$DL_{max} = \frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{L_{m\acute{i}n}} \leq 0.12$$

Donde:

$DL_{m\acute{a}x}$  – Diferencia de lámina máxima entre la lámina del emisor de mayor gasto y la lámina del aspersor de gasto mínimo ( $m^3/s$ ).

$L_{m\acute{a}x}$  – Gasto máximo de emisores ( $m^3/s$ ).

$L_{med}$  – Gasto mínimo de aspersores ( $m^3/s$ ).

Reporte técnico. Se debe hacer un reporte indicando cuáles secciones de riego se encontraron funcionando con presiones de operación diferentes a las indicadas en la guía del operador y con el ajuste realizado para regularizar el sistema y obtener las eficiencias de proyecto.

Es muy importante que, si el sistema de riego no tiene la lámina de riego por hora que aplica, es indispensable obtenerla y dejarla definida para que el operador pueda saber la lámina de riego que aplica en función del tiempo que riega.

Si se pretende obtener parámetros para comparar sistemas de riego entre sí, puede reportarse la presión media de operación de todas las secciones de riego, su desviación estándar y su coeficiente de variación. Estos indicadores pueden fallar si la población no corresponde a una distribución normal o las desviaciones de la media se deben a sesgo y no a un proceso aleatorio.

### 5.6.2.2.3. Evaluación de la uniformidad de distribución hidráulica del sistema (UDH) o eficiencia de distribución hidráulica

La uniformidad de distribución hidráulica de los gastos de los aspersores nos indica el grado de desempeño hidráulico del sistema de riego. Este indicador de uniformidad corresponde a las diferencias de intensidad de lluvia entre aspersores. Se basa en la cantidad de agua que suministran los aspersores a sus áreas de influencia y, como depende de sus presiones de operación, este factor de la -uniformidad es hidráulico. Los valores del indicador dependen de la magnitud de las diferencias de descargas de los emisores en el campo.

Si este indicador tiene un valor bajo, puede generar recomendaciones de cambiar diámetros de tuberías, de aspersores o de sus boquillas, con la finalidad de reducir las diferencias de descarga de los aspersores.

Cuando la diferencia de descargas máxima de los aspersores es de 10%, entonces del orden del 60 al 75% de los aspersores descargan caudales por debajo de la media, y del 40 al 25% descargan gastos mayores que la media, lo que se considera normal.

Para determinar la uniformidad de descarga de los emisores o aspersores en un sistema de riego, se aforan los emisores de la tubería regante o de la sección de riego para determinar el gasto medio de descarga, y se obtiene también la media de la cuarta parte de los valores menores obtenidos en las mediciones.

Cuando se muestrea para determinar la uniformidad hidráulica, es importante analizar la distribución de las tuberías en campo, la topografía y la posición del equipo de bombeo, con la finalidad de seleccionar la sección o los aspersores que deben ser aforados para determinar el parámetro de la uniformidad de la descarga de los emisores.

Para calcular la uniformidad hidráulica del sistema de riego, se sigue el procedimiento que se presenta a continuación:

Decisión del tamaño de la muestra. La toma de la muestra de aspersores por aforar se hace con base en el número de emisores por sección de riego, como se muestra en el cuadro 5.16.

**Cuadro 5.16.** Tamaño de la muestra de aspersores.

NÚM. DE ASPERSORES POR SECCIÓN	TAMAÑO DE MUESTRA
0-36	9
>36	16 - 64

## Procedimiento

1) Se selecciona una tubería regante o una sección de riego que tenga las características representativas del área de riego, de preferencia en un 75% del conjunto del sistema y, además, también debe incluir el tramo de tubería o el área de la sección que esté en las condiciones más difíciles (regantes de las más largas, en contra pendiente o con pendientes mayores del 5%).

2) Cuando se estudia una tubería regante, se muestrea toda la tubería. De preferencia se debe obtener el 60% de los datos de la muestra en la parte que tenga presiones menores, el 20% en la parte que tenga las descargas o presiones mayores y, el resto, en la zona media. En el caso de muestrear un sistema por secciones, en cada una se eligen cuatro laterales o regantes, de tal forma que una sea la más cercana a la unidad de control autónoma; otra, la más alejada; la tercera, situada a un tercio de la longitud que separe a las dos primeras (Ilustración 5.61.) y, la cuarta, a dos tercios.

En cada una de estas tuberías laterales o regantes, se seleccionan cuatro posiciones de emisores: la primera, la más cercana al punto de alimentación de la regante; la última, la más alejada y, entre ambas, las situadas a un tercio y dos tercios de la separación entre las dos primeras (Ilustración 5.61.).

3) Cuando el tamaño de muestra es 16, en cada sitio se afora un emisor. Si el número de emisores a muestrear es mayor de 36, en cada una de las posiciones indicadas anteriormente (16 posiciones) se toman emisores adyacentes y, de esta forma, se completa el número de emisores de muestreo indicado.

**Nota: en el caso de encontrar un emisor obstruido o tapado parcial o totalmente, se debe registrar el problema y seleccionar uno adyacente para la prueba.**

4) Se pone a funcionar el sistema, de acuerdo con las condiciones normales de operación.

5) Las lecturas de las descargas de los aspersores deben ser tomadas después de que han empezado a funcionar bien; esto es, que debe haberse leído la presión de operación y autorizar el inicio de la prueba.

6) Se recoge en un recipiente el agua que sale en cada emisor seleccionado, con capacidad de recibir el volumen proyectado en el tiempo de muestreo. El tiempo de muestreo debe garantizar la precisión de muestreo proyectada. Se miden los volúmenes mediante recipientes y una probeta debidamente calibrados, y se anota el resultado individualizado en un formato preparado en la libreta.

**Error en el muestreo.** Se presenta, a continuación, un ejemplo para determinar el tiempo de captación del agua descargada por el aspersor:

Se requiere saber el tiempo necesario para obtener aproximadamente un error del 2% en el aforo.

Si se tiene un aspersor con descarga de 0.250 l/s, considerando que el tiempo necesario para poner la manguera con la descarga del emisor en la entrada del recipiente es un segundo, y que el tiempo para quitarla es otro segundo, los casos críticos que pueden presentarse son: 1) tardar un segundo en iniciar las lecturas, lo cual significa que durante un segundo entra agua al recipiente sin contabilizar el tiempo, y 2) que al indicar que dejen de introducir agua al recipiente, se reaccione un segundo tarde, lo cual implica que se agregue otro volumen de agua unitario. Por lo tanto, el volumen aportado en dos segundos es 0.5 litros de exceso.

Si el caso es que se retrasó el inicio y se adelantó el final del aforo, el volumen es de déficit. En los casos intermedios se compensan las aportaciones de exceso o de déficit, por lo que se compensan.

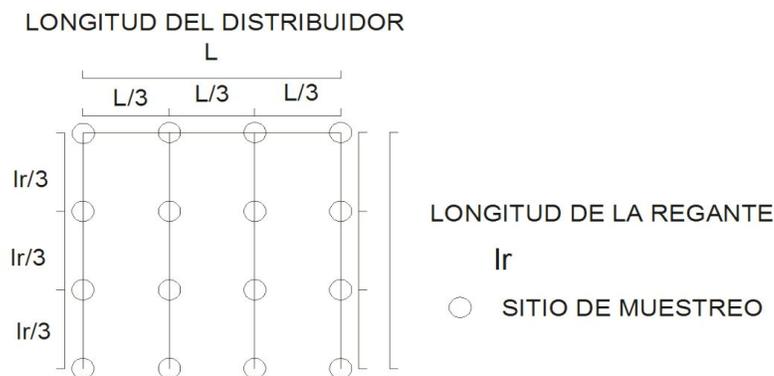
Para que el error sea igual o menor al 2%, el volumen del recipiente que se necesita utilizar se calcula de la siguiente manera:

El 2% se considera el volumen correspondiente al tiempo de dos segundos de operación del aspersor. Como el gasto es 0.250 l/s, el volumen de error sería 0.5 l; entonces, el 100% corresponde a:

$$V = \frac{100 * 0.5}{2} = 25 \text{ l}$$

Donde:

$V$  – Es el volumen del recipiente para aforar.



**Ilustración 5.61.** Elección de los emisores o sitios de muestreo en una subunidad o sección de riego.

7) Obtención del gasto o descarga media. Se calcula la media aritmética de los gastos obtenidos en las mediciones de la prueba, por sección de riego.

Para el caso de los valores máximo y mínimo, calcularlos de la manera siguiente:

**Determinación del gasto mínimo.** Se ordenan de mayor a menor los gastos o descargas de los emisores obtenidos en cada medición y se selecciona el 25% de los valores menores. Luego, se les calcula la media aritmética y se considera como gasto mínimo.

$$UDH = \left( \frac{Q_{m\frac{1}{4}bajo}}{Q_m} \right) * 100$$

*UDH – Uniformidad de distribución hidráulica (%).*

*$Q_{m\frac{1}{4}bajo}$  – Gasto medio del cuarto bajo (l/s).*

*$Q_m$  – Gasto medio (l/s).*

Cuando se requiere conocer el rango, eliminando los valores extremos, se determina el gasto máximo medio, ordenándose de mayor a menor los gastos o descargas de los emisores obtenidos en cada medición, y se selecciona el 5% de los valores mayores. Luego, se les calcula la media aritmética y se considera como gasto máximo. Se resta la media máxima de la media mínima y se obtiene el rango sin valores extremos.

#### 5.6.2.2.4. Evaluación de la uniformidad de la lluvia

Estudiar la uniformidad de la lluvia nos permite inferir recomendaciones para que el productor realice acciones de mejoras físicas o de operación del sistema, de acuerdo con los resultados de la evaluación.

Con la finalidad de caracterizar la uniformidad de lluvia, se han empleado los indicadores de uniformidad siguientes: el coeficiente estadístico, la uniformidad de lluvia calculada con el cuarto bajo de la lluvia de los aspersores y el coeficiente de uniformidad de Christiansen.

Otros autores, en su intención de que se exprese la uniformidad de riego del sistema mediante un solo indicador numérico, han integrado en una expresión la uniformidad hidráulica y la uniformidad de la lluvia, haciendo más difícil interpretar las fallas del sistema y complicando hacer recomendaciones para mejorarlo. Una de estas propuestas se incluyó en el capítulo 5.1.

En el caso de obtener niveles bajos en el coeficiente uniformidad, se debe registrar la información de los factores que causan la baja uniformidad, como puede ser el viento,

espaciamiento muy grande entre aspersores o entre líneas regantes. Para hacer ajustes o modificaciones y mejorar la distribución del agua asperjada, se puede traslapar más la lluvia de los aspersores, reduciendo su espaciamiento, tanto en la tubería de los aspersores como entre las tuberías regantes, o se puede bajar la presión de operación para obtener gotas de mayor tamaño para reducir la evaporación y el arrastre de agua por el viento.

Para complementar la información de las pruebas de uniformidad de lluvia es conveniente tener información de medidas ambientales, como son:

**Viento.** Registrar la velocidad y dirección del viento durante el periodo de la prueba y dibujar los sitios de las pruebas sobre un esquema. La velocidad y dirección del viento deberían ser monitoreados a intervalos no mayores de 15 minutos y registrarse. Las condiciones del viento deberían ser representativas de las condiciones de operación normal del sistema de riego. Velocidades del viento mayores a 3 m/s pueden tener efectos significativos sobre la uniformidad de aplicación.

**Evaporación.** Determinar la tasa de evaporación usando colectores de lluvia, como evaporímetros o similares a los utilizados como pluviómetros.

**Otras variables.** Registrar el estado del tiempo, la temperatura y la humedad relativa, medida o estimada durante la prueba el día de la evaluación.

Ubicación de la prueba. Si el área de riego esta a nivel, la localización más fácil de la prueba es generalmente donde se espera que se presenten las presiones de operación más bajas del sistema de riego. Si el sitio es desnivelado, debe hacerse un muestreo de presiones para seleccionar un área con presiones mínimas, que corresponderán a las precipitaciones mínimas generadas por los aspersores.

Topografía y elevación. Si el campo no está a nivel, determinar las diferencias de elevación entre los sitios de las pruebas y a lo largo del sistema como un todo. Si el relieve del terreno varía significativamente, es necesario considerar varios sitios de prueba para concluir sobre la uniformidad de aplicación del sistema de riego, de acuerdo con el diseño y las recomendaciones de operación.

**Duración de la prueba en sistemas fijos.** El tiempo de duración seleccionado para la prueba debería ser igual al tiempo de riego, o asegurar el volumen suficiente en los colectores para las mediciones que se requieren. Para sistemas fijos con tiempos largos de operación, se pueden usar tiempos menores.

Registrar la duración de la prueba y el tiempo normal de operación de cada posición. Asegurar los ajustes de cálculos con los ajustes de tiempos.

Preparación de la red de recipientes para la prueba de evaluación en sistemas fijos y portátiles mecanizados.

A. Cuando operan dos tuberías regantes con el espaciamiento normal:

Arregle una malla de colectores para captar la lluvia de seis aspersores adyacentes (tres aspersores en cada una de las dos hileras), ubicados en la zona de menor precipitación del sistema de riego. La malla de colectores debe trazarse dentro del área de los seis aspersores. Se sugiere definir las columnas de colectores como las líneas perpendiculares a la hilera de aspersores, y filas de colectores como las líneas paralelas a las tuberías con los aspersores.

B. Cuando opera sólo una tubería regante:

Arregle una malla de colectores tomando tres aspersores adyacentes (tres aspersores juntos en una tubería regante) en una parte del sistema riego que corresponda a la menor lámina de riego. La malla debe trazarse entre los aspersores de la orilla y extenderse a los dos lados de la tubería. Se sugiere que las columnas de colectores se consideren como las líneas perpendiculares a la hilera de aspersores, y filas de colectores como las líneas paralelas a las tuberías con los aspersores. Deberá simularse el traslape entre las tuberías para hacer las determinaciones de coeficiente de uniformidad. Con la finalidad que represente la uniformidad de riego real, será necesario usar el espaciamiento entre tuberías regantes del sistema de riego.

Malla para pruebas de uniformidad en sistemas de laterales móviles de avance frontal y cañones. Se puede poner una línea de pluviómetros en la dirección perpendicular a la del movimiento del equipo de riego. En el caso de poner cuadrícula de colectores, defina columnas de colectores como las líneas perpendiculares a las hileras de los hidrantes y, como fila de colectores, a las líneas paralelas a las hileras de los hidrantes.

El espaciamiento mínimo entre colectores debería ser del orden de 2 m, y el máximo debería ser aproximadamente de 10 m, de acuerdo con el sistema de riego y el tipo y tamaño del aspersor.

Es conveniente asegurar que el espaciamiento entre columnas de colectores sea un submúltiplo del espaciamiento entre las líneas de aspersores. Asegurarse que la primera y última columnas de colectores estén posicionadas a un medio del espaciamiento entre columnas de las dos líneas de aspersores de la prueba.

Asegurar que el espaciamiento entre hileras de colectores es un submúltiplo del espaciamiento entre aspersores, asegurar que la primera hilera de colectores está posicionada a un medio del espaciamiento entre colectores, y medir y registrar la posición de cada colector en la malla.

El sistema debería apagarse antes de que las lecturas de precipitación en los colectores se empiecen. Sin embargo, si la evaporación es significativa, el sistema debería ser apagado y los colectores leerse después del riego, con los ajustes propios por evaporación. Registrar las láminas calculadas de cada colector que serán sometidas al análisis de uniformidad.

Al final de la prueba no olvidar ajustar las lecturas de los colectores de lluvia porque las pérdidas de evaporación alteran la lámina total captada. Ello, con el valor de ajuste que se obtiene del evaporímetro o colector usado como evaporímetro.

Área regada por la tubería regante. Determinar la longitud y ancho de la franja húmeda del área regada, extendiéndose aproximadamente 75% del radio de mojado en el caso de los aspersores de la orilla; esto es, aspersores que no tienen traslape. En el caso de que los aspersores mojen mayor distancia que el espaciamiento entre tuberías de aspersores y que el espaciamiento entre aspersores, sólo tomar en cuenta el área en estudio y sobreponer la precipitación de las orillas como otro traslape.

Presión o gasto del aspersor. Asegurarse que los aspersores escogidos son de las mismas especificaciones, medir las presiones o gastos de los aspersores seleccionados para la prueba y utilizar formatos o la libreta de campo para registrar los datos. Debe estar bien identificado cada emisor por su posición en el campo.

En el caso de medir presiones en los aspersores, usar manómetro con tubo Pitot y procurar no alterar el flujo en la boquilla tratando de medir lo más próximo posible de la salida del chorro.

En el caso de los gastos, capturar todo el flujo del aspersor sin ahogar la boquilla o afectar la presión de operación. Usar una manguera adaptada a la salida del aspersor y descargar en un recipiente con volumen apropiado para obtener un 2% de precisión en el aforo.

Mida y registre el tiempo, en segundos, que tarda en llenarse el recipiente. Procure que el recipiente tenga entrada delgada (cuello) para aforar en esa parte y obtener mayor precisión.

Cálculo de la evaluación de la uniformidad de aplicación del agua al cultivo. En cada sitio de muestreo se debe tomar en cuenta el tiempo de riego seleccionado para la prueba, considerando el traslape real de campo y, por lo tanto, se utiliza el volumen total que debería precipitar en cada punto.

La muestra debe ser representativa del sistema de riego. En el caso de que la tubería regante esté a nivel, el área de muestreo deberá estar en la parte final de la tubería, considerando una longitud correspondiente al 25% de los aspersores, medido a partir de la punta de la tubería o del tapón, para tratar de obtener aspersores que funcionen con la presión de operación media del cuarto bajo.

Cuando se presentan desniveles topográficos, es conveniente hacer mediciones de presión con tubo de Pilot en los orificios de los aspersores, y seleccionar el área en donde se presenten las presiones bajas de operación.

Para evaluar esta uniformidad de aplicación del agua en sistemas de riego fijos y móviles, exceptuando pivotes, se utilizan el coeficiente de uniformidad de Christiansen y el coeficiente de variación estadístico.

a) Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC).

$$CUC = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_m|}{n * V_m} \right) * 100$$

Donde:

*CUC* – Coeficiente de uniformidad de Christiansen.

*V<sub>i</sub>* – Volumen captado en el recipiente *i*ésimo (cc).

*V<sub>m</sub>* – Volumen medio captado en la muestra (cc).

*n* – Número de recipientes de captación.

b) Eficiencia estadística (EE) o coeficiente estadístico de riego (CER).

$$EE = CER = \left( 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n - 1}}}{V_m} \right) * 100$$

c) Para determinar la uniformidad de aplicación del agua en los pivotes, se consideran las áreas de influencia regadas por cada aspersor o por cada anillo representado por un pluviómetro o recipiente de captación. Esto es de gran importancia, porque los aspersores que riegan al final de la tubería dominan superficies mayores que los aspersores cercanos al centro o pivote.

Coeficiente de uniformidad para pivotes (CUP).

$$CUP = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |V_i - V_m|}{\sum_{i=1}^n V_i * D_i} \right) * 100$$

Donde.

*CUP* – Coeficiente de uniformidad de Christiansen adaptado a pivotes.

*V<sub>i</sub>* – Volumen captado en el recipiente *i*ésimo (cc).

*V<sub>m</sub>* – Volumen medio captado en la muestra (cc).

$D_i$  – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación  $i$ , o también la posición ocupada por el pluviómetro  $i$ , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y  $n$  el más alejado ( $m^2$ ).

$n$  – Número de recipientes de captación.

d) Eficiencia estadística (EE) o coeficiente estadístico de riego (CER) para el caso de pivotes centrales. Para determinar la eficiencia estadística de aplicación del agua en los pivotes, se utiliza la fórmula considerando la ponderación por las áreas de cada anillo regado.

$$EE = CER = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\sum V_i D_i}{\sum D_i}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \frac{\sum V_i D_i}{\sum D_i})^2 D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}} \right) * 100$$

$V_i$  – Volumen captado en el recipiente  $i$ ésimo (cc).

$D_i$  – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación  $i$ , o también la posición ocupada por el pluviómetro  $i$ , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y  $n$  el más alejado ( $m^2$ ).

### Ejemplo 3. Análisis de la lluvia de un aspersor estándar.

Se requiere analizar y seleccionar el traslape necesario para regar uniformemente con una tubería regante de un sistema de riego por aspersión. Para hacer el trabajo, se llevó al cabo una prueba de operación de una tubería regante en una posición normal. Se trazó e instaló una red de pluviómetros, en los que se captaron volúmenes de lluvia y se transformaron a láminas para interpretar directamente como riego. Con los resultados se elaboró el cuadro 5.17.

**Cuadro 5.17.** Láminas medidas en una prueba de evaluación de una tubería regante.

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.80	2.54	5.34	6.10	6.61	5.84	5.34	3.05	0.76	0.00	0.00
2	0	0.80	2.60	5.20	6.30	7.24	6.86	4.70	2.60	0.51	0.00	0.00
3	0	0.90	2.80	5.34	6.61	7.88	7.88	4.07	2.16	0.25	0.00	0.00
4	0	0.90	2.70	4.90	6.00	8.01	7.88	3.94	2.29	0.64	0.00	0.00
5	0	0.80	2.54	4.07	5.59	8.13	7.88	3.81	2.41	1.02	0.00	0.00

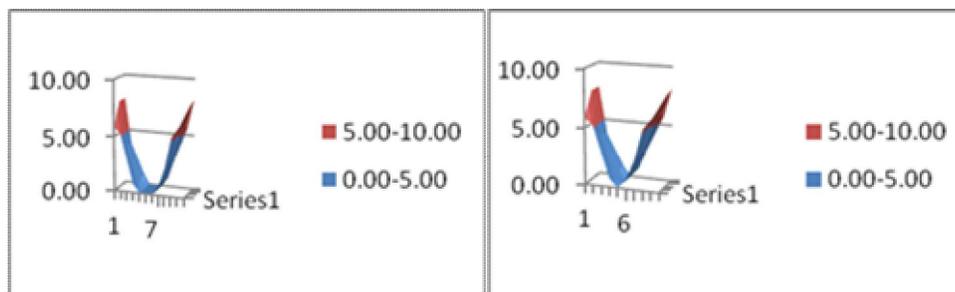
Se simuló el traslape de la tubería regante, ocupando tres condiciones de traslape: la primera con traslape en dos columnas de recipientes, la segunda con traslape en cuatro columnas y, la tercera, traslapando seis columnas, que fue el máximo traslape. Se calcularon los parámetros estadísticos y se organizó la información en el cuadro 5.18.

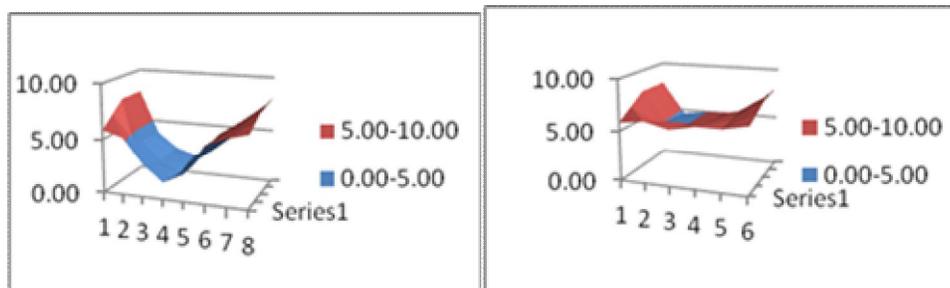
**Cuadro 5.18.** Parámetros estadísticos obtenidos del área regada con la tubería regante y caracterizada con diferentes condiciones de traslape.

CONCEPTO	SIN TRASL	TRASL 2 COL	TRASL 4 COL	TRASL 6 COL
Media	3.08	3.69	4.61	6.15
Desv. Est.	2.82	2.70	2.22	1.10
Coef. Var.	0.92	0.73	0.48	0.18
Coef. Est. Rgo.	8.25	26.93	51.99	82.09
Cu Crist.	19.17	46.53	72.03	92.64
Rango	8.13	8.13	6.98	3.52

Se observa claramente que sin traslape la uniformidad es muy baja y que, conforme se traslapa la lluvia, se mejora, se reduce la dispersión de valores y aumenta el coeficiente de uniformidad. Se concluye que el mejor traslape fue el de seis columnas. Sin embargo, al observar los datos originales, se ve que hay de un lado una columna con ceros y del otro lado dos columnas con ceros, por lo que se podría mejorar el riego si se tuviera un aspersor de mayor alcance o que se cerrará el espaciamiento entre tuberías de riego, porque la uniformidad todavía es baja.

En la Ilustración 5.62. se observa, en la parte superior izquierda, cómo queda una zona sin regar entre las dos posiciones de la tubería regante. En la parte superior de la derecha se observa que el traslape inicia el mejoramiento de la uniformidad. En la parte inferior izquierda, se observa que el traslape produce el efecto de aumentar las láminas aplicadas en la zona entre las dos líneas regantes y, por último, en la parte inferior derecha, se observa que el traslape mejoró mucho la uniformidad de lluvia.





**Ilustración 5.62.** Uniformidad del riego de una tubería de aspersores, sin y con traslapes entre tuberías.

#### 5.6.2.2.5. Evaluación global de la eficiencia

Con la finalidad de regar bien, sin déficits, es necesario conocer las partes que se deben integrar en la lámina de riego, de manera que se evite tener deficiencias de agua en el área cultivada.

Las componentes que deben sumarse son: la lámina de requerimiento de riego, la lámina para cubrir los déficits que se reportan por la falta de uniformidad de lluvia, la lámina correspondiente a las pérdidas por arrastre y evaporación, la lámina que debe compensar la falta de uniformidad hidráulica, y las láminas correspondientes a las pérdidas por conducción y a las pérdidas en el almacenamiento.

Considerando que debe satisfacerse el requerimiento de riego ( $RR$ ) y que también debe aplicarse la lámina de riego necesaria para compensar la falta de uniformidad en la lluvia o pérdidas por uniformidad de lluvia ( $P_{ull}$ ), es indispensable calcular la lámina de riego neta ( $LRN$ ) por aplicar en la parcela, integrando los dos conceptos. Para esto se usa la eficiencia estadística ( $EE$ ) o coeficiente estadístico de riego ( $CER$ ), y se tiene que:

$$LRN = \frac{RR}{EE} = \frac{RR}{(1 - CV)}$$

$$EE = CER = (1 - CV) = \frac{RR}{RR + P_{ull}} = \frac{RR}{LRN}$$

Donde:

$$P_{ull} = LRN - RR$$

Ahora, introduciendo las pérdidas por arrastre y evaporación en el análisis:

Considerando que debe satisfacerse la lámina de riego neta ( $LRN$ ) y que también debe aplicarse la lámina de riego necesaria para compensar las pérdidas por arrastre y evaporación, es indispensable calcular la lámina ajustada por arrastre y evaporación ( $LRA_{aye}$ ), integrando los dos conceptos. Para esto se usa la eficiencia por arrastre y evaporación ( $E_{aye}$ ), y se tiene que:

$$LRA_{aye} = \frac{LRN}{E_{aye}}$$

$$E_{aye} = \frac{LRN}{LRA_{aye}} = \frac{LRN}{LRN + P_{aye}}$$

$$P_{aye} = LRA_{aye} - LRN$$

Se tiene que satisfacer la lámina ajustada por arrastre y evaporación ( $LRA_{aye}$ ), y ajustarla con la eficiencia de uniformidad de distribución hidráulica ( $EA_{udh}$ ), obteniéndose la lámina de riego ajustada por pérdidas generadas por la falta de uniformidad hidráulica ( $LRA_{udh}$ ):

$$LRA_{udh} = \frac{LRA_{aye}}{EA_{udh}}$$

$$EA_{udh} = \frac{LRA_{aye}}{LRA_{udh}}$$

Por lo que las pérdidas por falta de uniformidad hidráulica ( $P_{udh}$ ) se calculan de la manera siguiente:

$$P_{udh} = LRA_{udh} - LRA_{aye}$$

Se tiene que satisfacer la lámina de riego ajustada por las pérdidas generadas por la falta de uniformidad hidráulica ( $LRA_{udh}$ ), y ajustarla con la eficiencia de conducción ( $EC$ ), obteniéndose la lámina de riego ajustada por las pérdidas generadas por la conducción del agua en la red de distribución ( $LRC$ ):

$$LRC = \frac{LRA_{udh}}{EC}$$

$$EC = \frac{LRA_{udh}}{LRC}$$

$$P_{cond} = LRC - LRA_{udh}$$

Por último, tomando en cuenta la lámina correspondiente a las pérdidas en el almacenamiento, y sumándolas a la lámina ajustada por conducción, se llega a la lámina de riego bruta, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$LB = \frac{LRC}{E_{alm}}$$

$$E_{alm} = \frac{LRC}{LB}$$

$$P_{alm} = LB - LRC$$

Por último, la eficiencia global corresponde a:

$$EG = \frac{RR}{LRB}$$

$$LRB = \frac{RR}{EG}$$

Para que la eficiencia global sea aceptable, se requiere que el producto de las eficiencias parciales sea igual a la eficiencia global. Por lo que se tiene:

$$EG = EE * EA_{ays} * EA_{udh} * EC * E_{alm}$$

Esto se comprueba a continuación:

$$EG = \frac{RR}{LRN} * \frac{LRN}{LRA_{ays}} * \frac{LRA_{ays}}{LRA_{udh}} * \frac{LRA_{udh}}{LRC} * \frac{LRC}{LB}$$

Entonces:

$$EG = \frac{RR}{LB}$$

También, la lámina bruta se puede expresar de la manera siguiente:

$$LB = RR + P_{ull} + P_{ays} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

Entonces, las pérdidas totales son:

$$P_{total} = LB - RR = P_{ult} + P_{pys} + P_{udh} + P_{cond} + P_{atm}$$

**Ejemplo 4.** Se requiere proyectar la aplicación de agua a un cultivo para satisfacer su requerimiento de riego, estimado en 5 cm, con un sistema de riego que tiene aprovechamiento de pozo profundo y sistema de riego por aspersión. El aprovechamiento no cuenta con estanque de almacenamiento, por lo que no hay pérdidas por ese concepto. Como no existe proyecto o información técnica del sistema de riego, se realizó un estudio de evaluación de su funcionamiento y se obtuvieron los resultados siguientes:

Las pérdidas en la conducción corresponden al 2% del gasto que se conduce por el sistema entubado y se deben a fugas en empaques y válvulas.

Espaciamiento entre tuberías = 12 m.

Espaciamiento entre aspersores = 9 m.

De la prueba de uniformidad de lluvia de una hora se obtuvo:

La lámina media captada en los pluviómetros:

$LR_{cap} = 7.79$  mm.

La desviación estándar  $DEST = 1.102$ .

El coeficiente de variación:  $CV = 0.1414$ .

El coeficiente de uniformidad estadística:  $CUE = 0.8586$ .

El rango fue:  $R = 3.52$  mm.

Se hizo un estudio de la uniformidad de distribución hidráulica por simulación de la tubería de riego por aspersión y resultaron los siguientes gastos en los aspersores:

**Cuadro 5.19.** Resultados del cálculo de la descarga de los aspersores.

N	Q L/S	N	Q L/S
1	0.25	10	0.255
2	0.25	11	0.257
3	0.25	12	0.259
4	0.25	13	0.262
5	0.251	14	0.265
6	0.251	15	0.268
7	0.252	16	0.272
8	0.253	17	0.277
9	0.254		

El gasto medio en la tubería regante:  $Q_m = 0.2574$  l/s.

Gasto medio del cuarto bajo:  $Q_{m1/4bajo} = 0.2502$ .

$$UDH = \left( \frac{Q_{m1/4bajo}}{Q_m} \right) * 100 = \left( \frac{0.2502}{0.2574} \right) * 100 = 97.2$$

Uniformidad de distribución hidráulica = 0.972.

La lámina de riego aplicada por los aspersores fue:

$$LR_{aplic} = \left( \frac{0.2502 * 3600}{12 * 9} \right) = 8.34 \text{ mm}$$

$LR_{aplic} = 8.34$  mm en una hora con gasto medio del cuarto bajo.

La lámina de riego captada en los pluviómetros fue:

$$LR_{cap} = 7.79 \text{ mm.}$$

Se calculó la lámina que se perdió por arrastre y evaporación:

$$LRA_{ave}/h = 0.55 \text{ mm en una hora.}$$

$$LRN = \frac{RR}{(1 - CV)} = \frac{5}{(1 - 0.14)} = 5.82 \text{ cm}$$

Las pérdidas por uniformidad de lluvia son:  $P_{ull} = 5.82 - 5.0 = 0.82$  cm.

El sistema aplica 8.34 mm/h y llegan al cultivo 7.79 mm/h; entonces, para aplicar 5.82 cm, debe regar  $5.82/0.779 = 7.47$  h.

Las pérdidas por arrastre y evaporación son:  $P_{aye} = 0.055 * 7.47 = 0.4108$  cm.

$LRA_{aye} = LRN + P_{aye} = 5.82 + 0.055 * 7.47 = 6.23$  cm.

$$EA_{aye} = \frac{5.82}{6.23} = 0.9342$$

Como  $EA_{udh} = 0.972$  calculada en el estudio hidráulico,

$$LRA_{udh} = \frac{6.23}{0.972} = 6.41 \text{ cm.}$$

$$P_{udh} = LRA_{udh} - LRA_{aye} = 6.41 - 6.23 = 0.18 \text{ cm}$$

Como la eficiencia de conducción es = 0.98, entonces:

$$LRC = \frac{6.41}{0.98} = 6.54 \text{ cm}$$

$$P_{cond} = LRC - LRA_{udh} = 6.54 - 6.41 = 0.13 \text{ cm}$$

Como no hay estanque o reservorio para que se presenten pérdidas por evaporación, ya se puede calcular la eficiencia global:

$$EG = \frac{RR}{LB} = \frac{5}{6.54} = 0.765 \text{ o } 76.5 \%$$

Verificación por el método del requerimiento de riego y la suma de las pérdidas en el sistema:

$$LB = RR + P_{ull} + P_{evap} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

$$LB = 5.00 + 0.82 + 0.41 + 0.18 + 0.13 + 0 = 6.54 \text{ cm.}$$

Por lo anterior, se considera que el planteamiento propuesto de la lámina de riego bruta es correcto.

**Cuadro 5.20.** Procedimiento de cálculo del ejemplo en resumen.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	VALOR PROYECTO	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego (cm)	DATO	5.000	5.000	
Coeficiente de variación de prueba	DATO	0.141		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		5.823	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			0.823
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	DATO	0.934		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		6.235	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			0.412
Eficiencia de aplicación por uniformidad de distribución (Eaudh)	DATO	0.972		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eaudh$		6.415	
Pérdidas por uniformidad de distribución (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.180
Eficiencia de conducción (EC)	DATO	0.980		
Lámina de riego nivel conducción (LRC)	$LRC=LRAudh/EC$		6.545	
Pérdidas de conducción (PC)	$PC=LRC-LRAudh$			0.131
Eficiencia de almacenamiento (EALM)	DATO	1.000		
Lámina bruta (LB)	$LB=LRC/EALM$		6.545	
Pérdidas en almacenamiento (PALM)	$PALM=LB-LRC$			0.000
Suma pérdidas (SP)				1.545
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$		0.764	
Verificación	$LB=RR+SP$		6.545	

### 5.6.3. Evaluación económica

Con la finalidad de conocer si la inversión en un sistema de riego cumplió con las expectativas que tuvo el productor al comprarlo, sobre ahorros de agua, ahorros de energía e incrementos de producción y productividad, es necesario hacer un balance económico para obtener indicadores que permitan concluir sobre el mejoramiento obtenido.

La mayoría de los sistemas de riego se adquieren, instalan y operan para obtener beneficios al productor. Entonces, es necesario determinar todos los costos de un sistema de riego y las utilidades que genera. El costo total puede ser comparado con los beneficios recibidos o con el incremento en ingresos para determinar cuál es el beneficio obtenido y generado por el sistema.

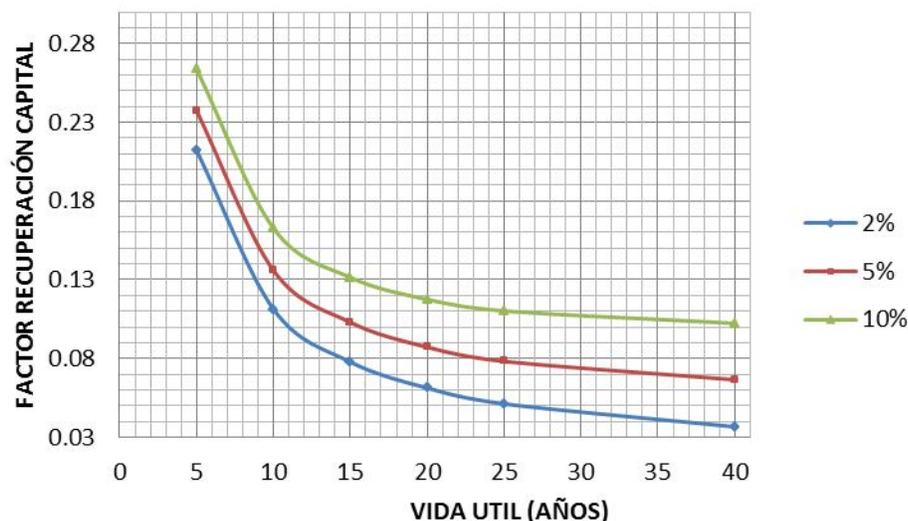
El costo de adquisición del sistema de riego parcelario puede ser menor que la tercera parte del costo total del sistema, incluyendo costos de operación y conservación en su vida útil (cuadro 5.21., los años de depreciación son que se consideraron los años con vida útil del sistema). A continuación, se presenta una guía de cálculo de los costos de un sistema de riego.

**Cuadro 5.21.** Periodos estimados para depreciación de los componentes de un sistema de riego por aspersión.

PERIODOS ESTIMADOS PARA DEPRECIACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN	
Componente	Años de depreciación
Pozo	25
Bomba	15
Unidad de energía	
Diesel	15
LP	12
Gasolina, combustible de tractor	9
Gasolina del aire acondicionado	4
Electricidad	25
Motor de potencia	10
Estructuras de concreto	20
Tuberías de concreto	20
Medidores de madera	8
Tuberías para distribución de agua	40
Tuberías de acero revestidas enterradas	20
Tuberías de aluminio para aspersión	15
Cabezal de aspersión	8

El factor de recuperación del capital, como se utiliza aquí, combina la depreciación y el interés sobre las inversiones en un indicador numérico. Multiplicar el costo inicial del equipo por este indicador y calcular cuánto cuesta el equipo por año.

A continuación, se incluye la Ilustración 5.63., que presenta la relación entre los años de vida útil de los componentes del sistema de riego, la tasa de interés compuesto en porcentaje y el factor de recuperación de capital.



**Ilustración 5.63.** Factor de recuperación de capital.

#### 5.6.3.1. Costos del sistema de riego

Los costos siguientes deberían estimarse:

##### a) Costos fijos

Son todos los costos, incluyendo impuestos y seguros sobre el capital inicial o ampliado. Esto debería incluir los cargos e intereses de la depreciación anual sobre el capital invertido (cuadro 5.23.).

##### b) Costo de obtener el agua para riego

**Los derechos de riego en el sistema de distribución.** Los cargos básicos por el agua por hectárea.

**Costos de construcción sistema de bombeo.** Costos de construcción del pozo, de la planta de bombeo, de estanques, de canales, etc. Cargos de subestación eléctrica.

**Costo del sistema de distribución y aplicación del predio.** Costos de la tubería de conducción y distribución, tuberías regantes, aspersores, equipos y accesorios. Costos de instalación.

**Impuestos y seguros.** Que se hayan pagado para el desarrollo del sistema de riego o su operación.

### c) Costos anuales de operación y conservación

Son los correspondientes a: mano de obra necesaria para la distribución del agua (cuadro 5.22.), costos de combustibles y energía eléctrica, cargos de mantenimiento de regaderas y nivelación de tierras.

**Cuadro 6.22.** Mano de obra estimada por hectárea de riego.

MANO DE OBRA ESTIMADA POR HECTÁREA POR RIEGO			
Tipo de movimiento	Rango en minutos	Promedio en minutos	Tiempo total por ha por riego minutos u horas
Movimiento manual:			
Movimiento	50-100	75	95 min o 1.58 h.
Retorno	15-25	20	
Sideroll (mecanizado)			
Movimiento	20-30	25	39 min o 0.65 h.
Retorno	10-15	12	
Enderezar	2	2	
Tractor y remolque final			
Movimiento	17-27	22	32 min o .533 h.
Retorno	7-12	10	

- **Ejemplo 5. Cálculo de costos de un sistema de riego por aspersión**

Un campo de 16.187 ha cultivado con alfalfa, se riega con aspersión portátil manual. La fuente de suministro de agua es un estanque que está en el campo y no hay cargo por usar el agua. El sistema es diseñado para cubrir 16.187 ha en diez días y la época de riego consta de 220 días. Dieciocho riegos se aplican con volumen anual de 16,153.84 m<sup>3</sup> por ciclo de cultivo. La mano de obra aprovechable es \$22.80 por hora. El sistema de riego se usa con dos movimientos por día. El sistema es cambiado de posición dos veces en 24 horas. El espaciamiento es 12.2 m por 18.28 m. La intensidad de precipitación es 0.86 cm por hora. El costo del sistema total instalado es de \$270,000.00, distribuidos como sigue:

Tubería principal de aluminio de 5 y 4 pulgadas de diámetro (\$115,200.00). Dos tuberías regantes de tres pulgadas (\$57,600.00). Con 33 aspersores (\$10,800.00). Planta de bombeo (\$86,400.00), bomba centrífuga eléctrica de 15 hp y 17.68 l/s a 42.7 m de carga dinámica total (CDT); se requieren 14 bhp caballos de potencia al freno.

### Cuadro 5.23. Costos fijos.

COMPONENTE	COSTO PESOS	VIDA UTIL AÑOS	FACTOR DE RECUPERACIÓN DE CAPITAL	COSTO POR AÑO
Bomba	86,400.00	15	15 años al 5% = 0.0963	8,320.32
Tubería principal de aluminio	115,200.00	15	15 años al 5% = 0.0963	11,093.76
Regantes de aluminio	57,600.00	15	15 años al 5% = 0.0963	5,546.88
Aspersores	10,800.00	8	8 años al 5% = 0.1547	1,670.76
Total por año				26,631.72

**Nota: impuestos y seguros deberían ser agregados a este costo anual.**

Considerando 1.557 horas necesarias para regar una ha y que la superficie total es 16.187 ha., el número de riegos es 18 y el costo de la mano de obra es de \$ 22.80 por hora (cuadro 5.24.). Si se consideran ocho cortes, el costo parcial sería \$5,171.03.

### Cuadro 5.24. Costo por mano de obra.

COMPONENTE	HORAS POR HA	SUPERFICIE EN HA	NO. DE RIEGOS	TIEMPO EN HORAS	COSTO POR HORA PESOS	COSTO ANUAL
Mano de obra	1.557	16.187	18	453.66	22.80	10,343.38

Los costos de la energía se estiman con la información siguiente: para la potencia del motor al freno se utiliza el factor de conversión a kilowatts hora y el número de días de bombeo; considerando las 24 horas del día, se obtienen los kilowatts por ciclo y con el costo del kilowatt se obtiene el costo de la energía (cuadro 5.25).

### Cuadro 5.25. Costos de energía.

COMPONENTE	BHP	BHP*KW	KW*H	DIAS	HORAS POR CICLO	KW*CICLO	COSTO POR KW	COSTO DE ENERGÍA \$
Potencia	14	0.93	13.02	220	5280	68,745.60	0.12	8,249.47

Ahora, considerando todos los costos, se tiene que la suma es \$35,177.54 y que el costo por ha es de \$ 2,173.14 (cuadro 5.26).

### Cuadro 5.26. Costos totales.

CONCEPTO	COSTO EN PESOS
Costos fijos totales	26,631.72
Costos de mano de obra	10,343.38
Costos de energía	8,249.47
Costo total	45,224.57
Costo por ha	2,793.88

### 5.6.3.2. Costos del cultivo, valor de la cosecha y relación beneficio-costo

Para calcular los costos del cultivo es necesario incluir las actividades y costos que se generan por producir el cultivo, como son: preparación del terreno, siembra o plantación, fertilización, riego, aplicación de agroquímicos, cosecha, asesoría técnica, renta de la tierra, cuota por servicio de riego, seguro agrícola y los que apliquen. En el cuadro 5.27. se presentan los costos considerados en el ejemplo.

**Cuadro 5.27.** Costo por actividad.

ACTIVIDAD	COSTO
1.- Preparación del terreno	1,628.39
2.- Siembra y/o plantación	3,158.46
3.- Fertilización	2,001.12
6.- Riego	2,793.88
9.- Cosecha	5,131.07
Costo total	14,712.92

En el cuadro 5.28. se incluyen los ingresos por venta de la producción (valor de la cosecha), gastos por el costo de producción, utilidades, relación beneficio-costo, productividad de la tierra, productividad del agua en relación al producto y a sus ingresos por venta de la producción.

**Cuadro 5.28.** Valor de la cosecha, costo de producción, utilidad, relación beneficio-costo e indicadores.

CONCEPTO	INDICADORES
<b>Cultivo</b>	<b>Alfalfa</b>
Ingresos por venta de producción (\$)	679,560.00
Costo de producción (\$)	238,158.04
Utilidad (\$)	441,401.96
Productividad de la tierra en producto (t/ha)	21.00
Productividad de la tierra en pesos (\$/ha)	42,000.00
Producción del agua (kg/m <sup>3</sup> )	1.30
Productividad del agua (\$/m <sup>3</sup> )	2.60
Relación beneficio-costo (RBC)	2.85

### 5.6.4. Procedimiento para evaluar un sistema de riego

A continuación, se presentan las acciones para desarrollar evaluaciones de sistemas de riego.

1. Inspección visual del sistema de riego y del cultivo, mediciones básicas de operación y pruebas de uniformidad hidráulica.
2. Hacer una estimación de la eficiencia del sistema por ciclo de cultivo o por riego.
3. Evaluación del equipo de bombeo, tuberías y costos de energía.

Estas acciones involucran evaluar el sistema o sus prácticas de manejo en su forma usual de operar. Los resultados del análisis y reporte técnico de la evaluación, deben compararse con parámetros estándar para hacer las recomendaciones pertinentes.

Para evaluar un sistema de riego es necesario cumplir los siguientes requisitos:

- El evaluador debe conocer el criterio del agricultor para determinar cuánto y cuándo regar.
- Debe operar el sistema de riego en las condiciones normales de funcionamiento.
- El evaluador debe elaborar y realizar un plan de evaluación del sistema.

#### 5.6.4.1. Proceso de evaluación

Para realizar con calidad las evaluaciones de los sistemas de riego, se presentan a continuación las fases del proceso.

- Decisión de realizar la evaluación del sistema de riego.
- Definición de objetivos o de que aspectos se estudiarán.
- Concertación con un evaluador.
- Obtención de la información básica.
- Análisis de documentos e información.
- Proyecto de trabajos de campo.
- Mediciones de campo y resultados.
- Análisis del sistema.
- Elaboración del reporte.
- Elaboración de decisiones.
- Cambios en el sistema, operación y conservación.

#### 5.6.4.2. Planeación de una evaluación

El proceso de evaluación se basará en la preparación previa y bien hecha del plan de trabajo, elaborado para la visita de campo.

Deben decidirse los objetivos de la evaluación y el nivel de información requerido, porque están relacionados con el equipo y los materiales necesarios para desarrollar el trabajo y obviamente con sus costos.

Esta preparación debe tomar en cuenta toda la información que se puede obtener del sistema de riego instalado, como son los datos generales de ubicación, caminos de acceso, expediente del proyecto del sistema de riego, con memoria de cálculo, memoria descriptiva, planos de construcción y guía de operación del sistema.

#### 5.6.4.3. Requerimientos generales para conocer el grado de desempeño

1) Capacidad del sistema. La cantidad de agua aplicada en cada riego debe satisfacer las necesidades del cultivo; esto garantiza que se suministre el agua en la cantidad requerida y con la oportunidad necesaria en todo su ciclo.

2) Lámina aplicada. La cantidad de agua aplicada durante un riego, no debería ser más grande que la lámina requerida para: almacenamiento en el punto de menor capacidad de retención del suelo, control de sales en el suelo y lámina correspondiente a las pérdidas por evaporación y arrastre por viento.

Todos los emisores de un sistema de riego, como mínimo, deben aplicar el volumen de agua necesario para generar la lámina de riego requerida en el punto de mínima retención de humedad del campo. Esto es muy importante porque, en muchos casos, se toma como emisor de control el que aporta el gasto medio de la tubería regante. En este caso, unos aspersores aplican volúmenes mayores que los necesarios y otros volúmenes menores.

3) Lámina precipitada horaria o intensidad de aplicación. El agua no debería ser aplicada más rápido que la velocidad de absorción. Sin embargo, debería aplicarse con el tamaño de gota y la intensidad suficiente para reducir las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento. No debe haber encharcamientos o escurrimientos superficiales.

4) Uniformidad de aplicación. Debe analizarse la uniformidad de aplicación del agua en las secciones de riego en todo el campo y si no es posible, seleccionar una sección representativa. Se debe considerar una diferencia de descarga máxima permisible entre aspersores y, por lo tanto, la diferencia de presiones de operación correspondiente.

5) Pérdidas de agua. La mayor parte de las pérdidas de agua en un sistema de riego por aspersión bien diseñado y operado, se presentan por la evaporación y por el arrastre del agua por el viento. Esto sucede entre la boquilla del aspersor y el follaje del cultivo. Las pérdidas no deberían ser mayores del 15% del flujo del sistema.

6) Volumen bruto de agua. El volumen total utilizado con el sistema de riego debe incluir las pérdidas en el almacenamiento y en la conducción, las pérdidas por falta de

uniformidad de distribución hidráulica, las pérdidas por arrastre y evaporación, las pérdidas por falta de uniformidad de lluvia y la lámina de control de salinidad.

7) Daños al cultivo. El agua debería ser aplicada de manera que no cause daños al cultivo o produzca efectos negativos en el suelo superficial. Puede tirar flores de las plantas o puede compactar suelo y formar costra.

8) Tamaños adecuados de tubos. La distribución de los tamaños de los tubos debería ser tal que haya un balance económico entre el costo de los tubos y el costo de la energía.

9) Estado físico de los componentes. El estado físico de los componentes del sistema de riego y su mantenimiento o conservación deben ser adecuados. Esto incluye el equipo de bombeo, los dispositivos de control, accesorios, las tuberías y sus conexiones.

10) Diagnóstico. Diagnosticar el funcionamiento del sistema de riego. Definir los aciertos o los problemas existentes de diseño, instalación, operación y conservación, para proponer las soluciones técnicas más sencillas y económicas de mejora.

#### 5.6.4.4. Objetivos y requisitos generales

Objetivos. Se realizan las evaluaciones de los sistemas de riego cuando se requiere:

- Apoyar técnicamente el proceso de entrega-recepción de un sistema adquirido e instalado.
- Conocer si el sistema funciona bien al inicio de los ciclos de cultivo.
- Saber si el personal que opera el sistema de riego está bien capacitado para su manejo y conservación.
- Definir cómo operar un sistema de riego que no tiene información de proyecto o instructivo de operación y conservación.
- Elaborar proyecto de mejora del sistema de riego en infraestructura o en operación y conservación. Establecer un proyecto de mejora continua.

#### 5.6.4.5. Evaluación de campo

- Revisar el plan de muestreo, objetivos, resultados esperados y materiales necesarios.

- Realizar la inspección visual y hacer un inventario de las partes sistema de riego por aspersión, con revisión de su estado físico.
- Verificar en campo las características de operación del sistema de riego.
- Determinar la cantidad de agua por reponer en el riego en la zona radical.
- Medir presiones y gastos en los puntos clave del sistema de riego para obtener la eficiencia de riego, y la uniformidad hidráulica del sistema de riego global y por secciones.
- Determinar la uniformidad de la lluvia y la uniformidad de distribución hidráulica del sistema de riego y considerar la importancia de los efectos de orilla.
- Estimar las pérdidas por evaporación y arrastre del viento.
- Calcular la eficiencia de aplicación del sistema de riego.
- Evaluar el manejo del sistema de riego.
- Hacer las recomendaciones para mejorar el sistema de riego, su operación y mantenimiento.

#### 5.6.4.6. Dispositivos y materiales para la evaluación.

Lo ideal es contar con un laboratorio móvil que incluya equipo de trabajo que permita:

- Registrar la información y procesarla con *software*.
- Ubicar el lugar con GPS y hacer croquis de la parcela o parcelas evaluadas.
- Análisis de suelos sobre fertilidad y salinidad.
- Aforos de gasto con medidores portátiles calibrados y aforos con el método de volumen y tiempo.
- Mediciones de láminas de agua precipitadas.
- Mediciones de presión en tomas fijas o con accesorios para adecuaciones.
- Mediciones de velocidades de viento, humedad relativa y temperatura.
- Mediciones de distancias.

Es conveniente contar con los materiales e información siguiente:

- Información general del predio: dueño y contacto, mapa o croquis de localización y domicilio. Fotos aéreas y plano de contorno. Mapa de caminos de acceso.

- Información de clima: evapotranspiración de referencia o datos para calcularla, datos de lluvia. Los datos deben ser correspondientes al periodo incluido en la evaluación del sistema de riego.
- Información de suelos: textura, características de retención de humedad, y salinidad.
- Profundidad de manto freático.
- Datos de la fuente de abastecimiento: tipo de fuente y calidad del agua, volumen concesionado o disponible para riego, ubicación en campo, gasto total y presión de operación. Sistema de prevención de obstrucciones en aspersores.
- Información del sistema de riego: distribución en campo del sistema de riego, planta de bombeo, tuberías e hidrantes y movimientos de las tuberías regantes. Edad del sistema y mantenimiento o mejoras. Guía de operación. Tipo de aspersor e información técnica.
- Información del cultivo: tipo, variedad, fechas de siembra y cosecha, y etapas de desarrollo fenológico.
- Información del manejo del sistema de riego: datos de monitoreo, intervalos y tiempos de riego. Profundidad de humedecimiento del suelo y láminas de riego programadas.
- Computadora portátil o formatos para captura de información y libreta de campo.
- Lapicero y goma.
- Teléfono celular y cámara.
- GPS (para obtener coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar).
- Medidor de gasto portátil.
- Anemómetro, termómetro y medidor de humedad.
- Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el bordo delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.
- Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones del orden de 2 a 10 ml por marca.
- Cronómetro.
- Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 m de longitud.
- Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.
- Barrena para suelos, bolsas de plástico, cinta para amarrar.
- Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.
- Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves Stillson y perica).
- Cintas métricas (metálica de 5 m; plástico de 50 m).
- Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa).
- Tubo de Pitot, manguera flexible para conectar manómetros.
- Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones del orden de 2 a 10 ml por marca.

#### 5.6.4.7. Organización de la visita

Es conveniente coordinarse con la persona encargada de proporcionar los requerimientos de información y que el operador tenga instrucciones de participar en la evaluación para que se involucre en el proyecto de mejora continua. Deben acordarse los puntos siguientes:

- Fecha de la evaluación, hora y lugar del encuentro con la persona encargada de proporcionar los requerimientos de información y el operador.
- Confirmar el tipo y nivel de la evaluación, resultados esperados y cuánto se debe pagar por el servicio.
- Asegurar que el sistema estará operando para su evaluación; esto implica que esté disponible en tiempo y en procedimientos.

#### 5.6.4.8. Realizando una evaluación

Lo ideal es que el dueño esté presente durante la evaluación para asegurar que el equipo esté operando correctamente o como funciona normalmente. El dueño debe aceptar hacer instalaciones de medición de gasto y presión si se requieren. Asimismo, tener el personal que opera y mueve las partes del sistema de riego.

Lo siguiente puede ser de ayuda:

- Por razones de protección personal, se requiere que se tomen las precauciones necesarias si el agua contiene algún tratamiento químico.
- Hacer una inspección antes de la prueba. Observar el desarrollo del cultivo y registrar anomalías, sobre todo si se observan efectos de mala distribución de la lluvia. Evaluar las condiciones del suelo respecto a humedad, retención de humedad y profundidad de crecimiento de las raíces. Ubicar los puntos de control y las posiciones de las tuberías regantes. Medir y registrar variaciones topográficas que influyan en el funcionamiento hidráulico de las tuberías regantes, principalmente en puntos clave del sistema.
- Cuando no se tiene un plano del sistema de riego en estudio. Es necesario preparar un plano o un croquis con el cabezal de control, la tubería principal, tomas o hidrantes, la tubería de conducción, distribuidores y regantes. Señalar la ubicación de reguladores de presión, válvulas de lavado y las posiciones donde se realizará o realizarán las pruebas.
- Poner a funcionar el equipo de medición. Verificar medidores de flujo y presión portátiles o fijos. Instalar los manómetros que se requieran en los puntos claves. Ubicar puntos para colectores de precipitación utilizados para determinación de la evaporación en ellos. En caso de sistemas de movimiento continuo, poner marcas

para determinar la velocidad. Establecer el sitio para determinación del estado del tiempo (anemómetro, higrómetro y termómetro).

- Entrenamiento. Practicar la toma de lecturas de los medidores de energía y flujo de agua, de manómetros. Verificar las condiciones de prevención de taponamiento de aspersores y que los aspersores estén en posición correcta.
- Verificación de la operación del sistema de riego. El operador debe iniciar el funcionamiento del sistema y se deben medir y registrar los gastos y las presiones de operación del cabezal de control. Verificar que el equipo esté funcionando correctamente. Registrar las presiones en puntos de control. Evaluar encharcamientos y escurrimientos. Evaluar fugas y aplicación de riego no programado. En caso necesario, medir la velocidad del equipo de riego.
- Verificación de aspersores. Revisar que no haya aspersores tapados o movidos o cualquier anomalía de la lluvia de la aspersión. Medir el gasto y el radio de mojado del aspersor en los sitios específicos programados.
- En las pruebas de uniformidad, registrar las condiciones de velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura. Hacer medidas durante la prueba.
- Poner el agua en los colectores de sitios seleccionados para medir la evaporación, con la lámina correspondiente a la prueba, y medir la lámina evaporada durante la prueba registrando volumen y tiempo. Cuando los colectores dejen de recibir lluvia, deben medirse los volúmenes captados, registrando cada dato.
- Al terminar de medir los colectores, se deben medir los utilizados para la evaporación. Volumen y tiempo.
- Para cañones viajeros, pivotes y avances frontales pueden requerirse pruebas específicas del movimiento de los equipos de riego.

#### 5.6.4.9. Analizando datos de una evaluación

Para el procesamiento y análisis de datos de evaluaciones de riego, se recomienda preparar *software* específico para facilitar el registro y los cálculos necesarios.

- Determinar el desempeño o funcionamiento del sistema de riego. Procesar los datos obtenidos para calcular los indicadores claves de desempeño del sistema evaluado en sus condiciones de operación. Comparar los resultados con valores de proyecto o reportados de buen funcionamiento. Identificar las causas de fallas en el funcionamiento y evaluar su contribución a la operación global. Relacionar causas con efectos para determinar acciones de mejora.
- Determinar la eficiencia global del ciclo anterior. Procesar la información obtenida del ciclo anterior para evaluar las condiciones de los riegos del ciclo anterior. Calcular los ahorros en dinero, que pueden hacerse al operar correctamente y también mejorando el sistema de riego. Estimar las pérdidas intrínsecas al sistema y las generadas por no manejar correctamente el sistema de riego.

#### 5.6.4.10. Preparando el reporte de una evaluación

La finalidad del reporte técnico es facilitar al propietario mejorar su sistema de riego y su operación para que ahorre agua, energía y produzca cosechas de altos rendimientos y de buena calidad. Para esto debe incluir lo siguiente:

- Presentar los indicadores de desempeño con conclusiones de los resultados y comparaciones con datos de referencia.
- Presentar las recomendaciones de mejoramiento físico o estructural y de operación y mantenimiento.
- Presentar recomendaciones de cuándo y cuánto regar para alta productividad.
- Incluir en el informe la memoria descriptiva de la evaluación con fotografías, la memoria de cálculo o reportes del programa de cómputo utilizado, conclusiones y recomendaciones. Adjuntar la base de datos.
- Incluir un resumen práctico de acciones de mejora estructurales, con las inversiones necesarias para el mejoramiento del sistema, y las no estructurales, con las conclusiones y recomendaciones de operación y mantenimiento para su mejoramiento general.

#### 5.6.5. Recomendaciones para el mejoramiento de sistemas de riego por aspersión

Un sistema de riego por aspersión puede usarse bien si se conocen sus bases de operación, sobre cuánto, cuándo y cómo regar. Además, es necesario conocer los indicadores de desempeño del sistema de riego para saber qué ajustes son los necesarios para su mejoramiento.

##### 5.6.5.1. Bases de operación de un sistema de riego por aspersión

Para operar bien un sistema de riego por aspersión, es necesario conocer cuatro aspectos básicos:

**Primero.** Cuánta agua se debe aplicar a un cultivo en cada riego para satisfacer sus necesidades hídricas, la lámina de control de sales, la lámina de exceso para compensar la falta de uniformidad de lluvia, la lámina para compensar el arrastre y la evaporación durante el riego, la lámina para en exceso que se aplica por falta de uniformidad de distribución hidráulica, la lámina para compensar las pérdidas por conducción y en el almacenamiento (deben aplicarse las láminas de acuerdo con las partes que integren el sistema de riego). Además, tomar en cuenta los requerimientos de sustentabilidad de la producción agrícola, con un sistema de riego por aspersión.

**Segundo.** Cuánta agua aplica un sistema de riego por aspersión en una hora, expresada en lámina asperjada por hora. Esto se refiere a la capacidad de aplicación de agua en las tuberías regantes o en las secciones de riego.

**Tercero.** Cuánta agua llega al suelo o al cultivo de la que se emite por el aspersor en una hora, dada en lámina precipitada horaria.

**Cuarto.** Con la lámina precipitada por hora que llega al cultivo o al suelo, se calcula el tiempo de operación de una tubería regante, de una sección de riego o del sistema de riego, de acuerdo con el número de regantes, de secciones de riego o del sistema de riego por aspersión.

#### 5.6.5.2. Indicadores de desempeño y acciones de mejora de un sistema de riego por aspersión.

El mejoramiento de los sistemas de riego por aspersión debe basarse en la evaluación previa a las acciones de mejora. De acuerdo con los resultados de la evaluación, deben realizarse las acciones de mejora. Para orientar sobre las acciones, se preparó el cuadro 5.29., sobre indicadores de desempeño de los sistemas de riego por aspersión y las acciones de mejora.

**Cuadro 5.29.** Cuadro de indicadores de desempeño y recomendaciones para mejoramiento.

INDICADOR DE DESEMPEÑO	VALORES MÍNIMOS %	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR
Coeficiente de uniformidad estadístico o eficiencia estadística.	80	Aumentar el traslape entre aspersores y entre tuberías regantes. Cambiar boquillas para incrementar el traslape y ajustar la presión igualando el gasto.
Eficiencia de aplicación por arrastre y evaporación.	85	Reducir la presión del aspersor para aumentar el tamaño de gota, sin afectar el traslape o cambiar boquillas para aumentar el traslape.
Uniformidad de distribución hidráulica o eficiencia de distribución hidráulica.	95	Aumentar el diámetro de la tubería regante o disminuir el número de aspersores para reducir diferencias de presión en los aspersores. Cambio de posición de tuberías en campo para reducir las diferencias de presión en los aspersores o cambiar boquillas.
Eficiencia de conducción.	98	Cambiar empaques de tuberías y válvulas, cambiar tuberías o piezas dañadas.
Eficiencia de almacenamiento.	Variable	Utilizar poliestireno o material flotante en estanques (donde no se produzcan peces), para evitar la evaporación y revestimiento o impermeabilización del fondo.
Eficiencia de riego global.	Variable	Jerarquizar los factores que influyen en la baja eficiencia global y atender los que repercutan en ahorros mayores de

INDICADOR DE DESEMPEÑO	VALORES MÍNIMOS %	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR
Productividad del agua	Variable	volúmenes de agua. Regar sin usar embalse para almacenar el agua. Utilizar el indicador de productividad del agua en relación a pesos de producto por unidad de volumen utilizado, para dar prioridad a lo económico.
Encharcamientos o escurrimientos	No se aceptan	Reducir la intensidad de precipitación o la lámina precipitada horaria, cambiando aspersores o boquillas

### 5.6.5.3. Recomendaciones generales de operación de un sistema de riego por aspersión

**Control en el cabezal principal.** Con el manómetro o medidor de flujo, se debe verificar la presión o el gasto de operación del sistema de riego por aspersión, que debe estar definido en la guía de operación para el administrador del sistema de riego, en la memoria de cálculo o en los planos del proyecto. También, debe incluirse el procedimiento de operación por secciones de riego o por hidrantes.

**Control en los hidrantes.** Los hidrantes en riego por aspersión son válvulas que sirven para regular la presión de entrada a la tubería regante y, por lo tanto, el gasto de la misma. Es muy importante que cada vez que se ponga a funcionar una tubería regante, con el hidrante se fije la presión de operación en la tubería, de manera que el riego pueda controlarse, porque si se tiene el gasto adecuado en la tubería regante, entonces el volumen aplicado sólo depende del tiempo de aplicación. Cabe hacer notar que pocos productores están enterados de que pueden controlar mejor sus láminas de riego y su eficiencia de aplicación siguiendo esta recomendación. Esto debería quedar evidente en evaluaciones de los sistemas de riego por aspersión.

**Traslape de lluvia entre aspersores.** Es necesario que en toda la zona de riego por aspersión se presenten traslapes, si es posible del 50% del diámetro de cobertura del aspersor para contrarrestar cualquier efecto de viento. Los traslapes de lluvia mayores al 50% del diámetro de mojado de los aspersores, debe usarse en zonas con vientos que puedan distorsionar el patrón de mojado. En las orillas de la parcela deberían usarse aspersores de 180 grados de ángulo de mojado, para evitar regar fuera del terreno .cultivado.

**Intensidad de precipitación.** Se considera la intensidad de precipitación como la lámina precipitada horaria que aplica el sistema o la tubería regante, teniendo en cuenta cuando el riego esta traslapado. Al regar con riego por aspersión, el agua debe penetrar en el suelo sin saturar su capa superficial; esto implica que la intensidad de precipitación sea menor que la capacidad de absorción de agua del suelo húmedo, o menor que la velocidad de infiltración básica del agua en el suelo. Al saturarse la capa superficial del suelo, el agua puede escurrir a otro sitio no proyectado, o encharcar y aumentar la infiltración con posibilidad de perderla por percolación. Saturar el suelo generalmente

implica reducir la productividad del cultivo, dependiendo del tiempo con condición de saturación.

**Lámina de riego deficitaria.** Es importante aclarar que no debe aceptarse que se proyecte aplicar láminas de riego que originen déficit de lámina en alguna parte de la parcela. Esto se debe a que hay técnicos que aplican la lámina media de los aspersores como la lámina neta y, por lo tanto, aplican una lámina que compensa los déficits en la mayoría de los aspersores, con los excesos que aplica una minoría de los mismos. Esto tiene como efectos la reducción de rendimientos o la aplicación excesiva del agua.

**Uso de la lámina media de la tubería regante.** Hay que recordar que no debe calcularse el tiempo de riego con la lámina media que aplica la tubería, porque la mayoría de los aspersores aplicaría menos que la media y el riego sería deficiente. Debe garantizarse que la lámina aplicada corresponda, al menos, a la media del cuarto bajo de los aspersores de la tubería regante, y debe tomarse en cuenta la lámina que reciben efectivamente el suelo o el cultivo para que se cumpla el riego, de acuerdo con el proyecto.

**Regando con aguas salinas.** La absorción de iones tóxicos y sus efectos en las plantas, ocurren regando durante periodos de tiempo con humedad relativa menor de 35%, con altas temperaturas y presencia de viento. Los cultivos sensibles al cloro y al sodio son los que se pueden afectar más fácilmente. Para reducir los efectos de toxicidad en las hojas por la aspersión, se recomienda regar de noche y evitar el riego durante la presencia de vientos secos y cálidos. Además, los cambios de posición de tuberías con aspersores deben hacerse en la dirección más apegada a la del viento, para que lave las hojas mojadas por transporte de gotas de la posición anterior; usar aspersores de giro rápido; aplicar intensidades altas de lluvia, sin encharcar, y riego con gotas grandes, sin que originen problemas de escurrimiento por compactación del suelo.

**Riegos para siembra.** Para desarrollar cultivos, se puede sembrar en suelo seco y suelo húmedo con riego por aspersión. En los dos casos, se tiene que regar el suelo sin cubierta vegetal, por lo que debe tenerse cuidado de no compactar la capa superficial para evitar formación de costras o arrastre de suelo. El tamaño de gota no debe ser grande o generado por baja presión de operación del aspersor; para evitar que se compacte el suelo, utilizar el aspersor dentro del rango alto de presiones de operación.

**Riegos contra acción de heladas.** Se puede utilizar el sistema de riego con altas presiones para atomizar el agua y generar pequeñas gotas de agua que floten y permitan que se enfríe el agua, en lugar de las células de las plantas. Esto implica que el equipo de bombeo tenga capacidad suficiente y se tengan materiales como tuberías y aspersores, para dominar la mayor parte del campo. Procurar regar en la zona de entrada del aire frío, para reducir su efecto sobre el cultivo.

**Cálculo de la lámina bruta de un riego.** Se debe integrar la lámina de riego que evite tener deficiencias de agua en el área cultivada, considerando las láminas para cubrir el

requerimiento de riego, los déficits que se generan por la falta de uniformidad de lluvia, las pérdidas por arrastre y evaporación, y el exceso necesario por la falta de uniformidad hidráulica del suministro de agua por los aspersores y las láminas para compensar las pérdidas en la conducción y en el almacenamiento. Obviamente, se usan las que deben aplicarse según sea el caso.

## **5.7. EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO**

### *5.7.1. Ejemplo de evaluación agronómica en riego por aspersión tipo pivote*

En el valle de Culiacán se realizó una evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión de pivote central. La superficie del lote es de 50 ha, la lámina de riego total aplicada a nivel de parcela fue de 1,080 mm. Se obtuvieron 7,240 toneladas.

El suministro de agua es de un pozo con un equipo de bombeo de turbina vertical, y se condujo con una regadera excavada en tierra hasta la entrada de la parcela, donde se tiene el cárcamo de bombeo para abastecer al equipo de riego de pivote central.

Textura del suelo: limo arenoso.

Conductividad eléctrica del extracto a saturación: 3 dS/m (suelo normal).

Conductividad eléctrica del agua de riego: 0.4 dS/m (buena, sin restricciones de uso).

El manto freático se encuentra a una profundidad de variable.

Se extrajeron para riego 887 millares de m<sup>3</sup> del pozo.

No se observaron escurrimientos superficiales ni encharcamientos durante el riego.

Se quiere saber:

¿Cuál fue el rendimiento de la caña o la productividad del suelo?

¿Cuál fue la productividad del agua?

¿Cuál fue la eficiencia de riego?

¿Cuál fue la eficiencia de conducción?

¿Cuál fue el volumen de las pérdidas de agua?

#### 5.7.1.1. Información obtenida sobre el cultivo de caña

Se revisó la información existente sobre caña. A continuación se presenta la información obtenida:

Periodo vegetativo: Perenne-soca: 365 días.

Necesidades de temperatura: 22-30 °C, rango de oscilación: 15-35 °C.  
Necesidades de horas luz para floración: indiferente.  
Limitaciones: Sensible a heladas; durante la maduración necesita clima medianamente frío (10-20 °C); además, seco y soleado.  
Necesidades de suelos: profundos, bien aireados, pH de 5-8.5, óptimo de 6.5.  
Tolerancia a la salinidad: moderadamente sensible.  
Profundidad del manto freático: 1.5 a 2.5 m.  
Necesidades de fertilizantes por ciclo: 100-200 N; 20-90 P y 125-160 K.  
Necesidades de agua por periodo vegetativo: 1,500-2,000 mm.  
Sensibilidad al suministro de agua: alta.  
Rendimiento (bajo riego): 110-150 t/ha. Sin problemas, cultivo sano y sin déficit de agua.  
Eficiencia de utilización del agua para el rendimiento cosechado: 5-8 kg/m<sup>3</sup> (80% de humedad) y de 0.6-1.0 kg/m<sup>3</sup> en azúcar, con 0% de humedad.

#### 5.7.1.2. Productividad del suelo y del agua en el cultivo de caña

##### ¿Cuál fue el rendimiento de la caña o productividad del suelo?

El rendimiento del cultivo (RC) fue:

$$RC = \frac{8240}{50} = 144.8 \text{ ton/ha}$$

De acuerdo con la información general, el rendimiento fue muy bueno.

##### ¿Cuál fue la productividad del agua?

El volumen de agua usada a nivel parcelario fue:

$$VA = \frac{1.080 * 50 * 10000}{1000} = 540 \text{ Mm}^3$$

El volumen bruto fue 887 millares de m<sup>3</sup>, necesario para hacer llegar 540 millares de m<sup>3</sup> a la parcela.

La productividad del agua bombeada en el lote de aspersión fue estimada de la manera siguiente:

$$PA = \frac{RC}{VAB} = \frac{7240}{887} = 8.16 \text{ ton/Mm}^3 = \frac{8.16 * 1000}{1000} = 8.16 \text{ k/m}^3$$

Con ese resultado, se considera muy buena la productividad del agua de riego o del sistema de riego; sin embargo, es necesario tomar en cuenta las aportaciones de manto freático y de la lluvia para conocer el volumen aprovechado por el cultivo y la verdadera productividad del agua de riego.

Para el análisis del problema fue necesario hacer ajustes al requerimiento de riego por lluvia efectiva, por salinidad y por aportaciones de manto freático.

### 5.7.1.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia de la zona.

Primero, se obtuvieron los datos meteorológicos de una estación instalada en la zona y fueron los siguientes: temperatura media diaria, humedad relativa, velocidad del viento, horas de insolación y radiación solar, y con el programa *CROPWAT* de la FAO, se calculó la evapotranspiración de referencia diaria (ver cuadro 5.30.).

**Cuadro 5.30.** Parámetros meteorológicos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia.

MES	TEMP. MED. (°C)	HUMEDAD (%)	VIENTO (m/s)	INSOLACIÓN (horas)	RAD (MJ/m <sup>2</sup> /día)	Eto (mm/día)
Ene.	18.5	55	2	8	15.2	3.06
Feb.	18.9	55	2	8	17.2	3.45
Mar.	20.3	50	2	9	20.9	4.32
Abr.	22.7	46	1	10	24.2	4.57
May.	25.0	42	1	11	26.5	5.24
Jun.	28.2	36	1	12	28.0	5.91
Jul.	28.9	34	1	12	27.9	6.02
Ago.	28.4	35	1	11	25.9	5.6
Sep.	28.1	36	2	10	22.9	4.98
Oct.	26.5	42	2	9	19.1	5.08
Nov.	22.6	46	2	8	15.5	3.91
Dic.	19.8	50		8	15.4	3.24
<b>Total</b>	24.0	44	1.5	9.7	21.5	4.62

Para elaborar el requerimiento y el programa de riego se utilizó la información del cultivo y del suelo, que se presenta a continuación:

Para introducir la información al programa *CROPWAT* se hicieron las consideraciones siguientes: como el cultivo fue caña, se tomó el ciclo de cultivo de los perennes (365 días); para adecuar las etapas de desarrollo se tomaron, en la etapa inicial, treinta días; en la etapa de desarrollo, sesenta días; en la etapa de mediados, 180 días y, para la etapa final, 95 días.

La profundidad radical se consideró de 90 cm, durante todo el ciclo, por ser cultivo perenne.

La humedad fácilmente aprovechable considerada para determinar las láminas de riego fue de 0.65; esto implica que se consume el 65% del agua y es fácilmente aprovechable, de acuerdo con la textura del suelo.

El suelo identificado en las parcelas fue limo arenoso, con las características siguientes: humedad aprovechable total, 90 mm/m; espesor de suelo explorado y explotado por las

raíces, 90 cm, y el contenido de humedad aprovechable inicial en el momento de empezar el programa de riego, 0 por ciento.

5.7.1.4. Requerimiento de riego, tomando en cuenta la evapotranspiración del cultivo y la lluvia efectiva.

Por otra parte, se utilizó la precipitación pluvial mensual para calcular la lluvia efectiva, como se puede ver en el cuadro 5.31.

**Cuadro 5.31.** Precipitación pluvial mensual y la lluvia efectiva o aprovechable.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	LLUVIA EFECTIVA (mm)
Ene.	16.7	13.4
Feb.	9.9	7.9
Mar.	3.1	2.5
Abr.	2.5	2.0
May.	1.9	1.5
Jun.	23.5	18.8
Jul.	154.0	123.2
Ago.	210.4	168.3
Sep.	120.6	96.5
Oct.	54.4	43.5
Nov.	28.7	23.0
Dic.	27.7	22.2
Total	653.4	522.7

La evapotranspiración del cultivo calculada con los datos climatológicos fue 1,493.5 mm, y la precipitación efectiva de 522.7 mm, por lo que el requerimiento calculado con el método del programa FAO fue de 970.8 milímetros.

5.7.1.5. Requerimiento de riego tomando en cuenta la salinidad.

Para tomar en cuenta la calidad del agua y el criterio de salinidad, es necesario calcular el exceso de agua de riego necesario para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo con la finalidad de evitar la reducción de la producción del cultivo por los efectos de salinidad. Este exceso debe agregarse al requerimiento de riego.

Con el objetivo de determinar la lámina de sobrerriego para control de la salinidad, se requiere conocer la calidad del agua de riego y el contenido de sales solubles. Con ello se definen las condiciones en las que se puede trabajar con buena productividad. Por lo tanto, deben calcularse el factor de lavado y la lámina de sobrerriego, que deben adicionarse al requerimiento de riego.

En la bibliografía se encontró una relación entre la productividad de un cultivo y la salinidad en el extracto de la solución del suelo, que se representó con la ecuación siguiente:

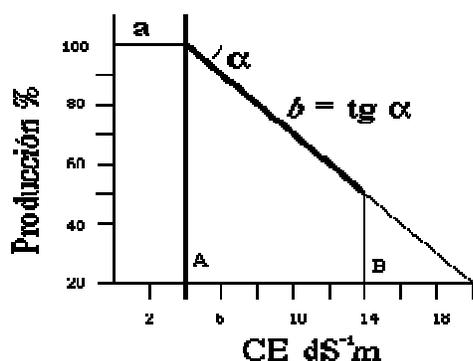
$$PC_s = 100 - b * (CE_{es} - a)$$

Para el caso de la caña, se tiene que:

$$a = 1.7 \text{ dS/m}$$

b = 5.75, por lo que:

$$PC_s = 100 - 5.75 * (CE_{es} - 1.7)$$



**Ilustración 5.64.** Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo).

**Cuadro 5.12.** Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo).

Ces (dS/m)	PC <sub>s</sub> (%)	REDUCCIÓN PRODUCCIÓN (%)
1.7	100.0	0.0
3.3	90.8	9.2
4.2	83.9	16.1
6.0	75.3	24.7
7.5	66.7	33.4
10.4	50.0	50.0

$$L = \frac{RR_1}{(1 - FL)}$$

Donde:

$$FL_{rf} = \frac{CE_r}{2 * (CE_{er})_{máx}}$$

El agua de riego tiene conductividad de 0.45 dS/m, y la conductividad del extracto de suelo a saturación es 3.0 dS/m (cuadro 5.32.); se requiere que la conductividad eléctrica del extracto de suelo no se incremente, por lo que debe calcularse la fracción de lavado de sales.

Como el riego es frecuente, se utiliza la fórmula:

$$FL_{rf} = \frac{CE_y}{2 * (CE_{zr})_{máx}} = \frac{0.45}{2 * 3.0} = 0.075$$

De manera que la lámina total de riego ajustada para control de salinidad queda:

$$RR_{ajs} = \frac{97.08}{(1 - 0.075)} = 104.9 \text{ cm}$$

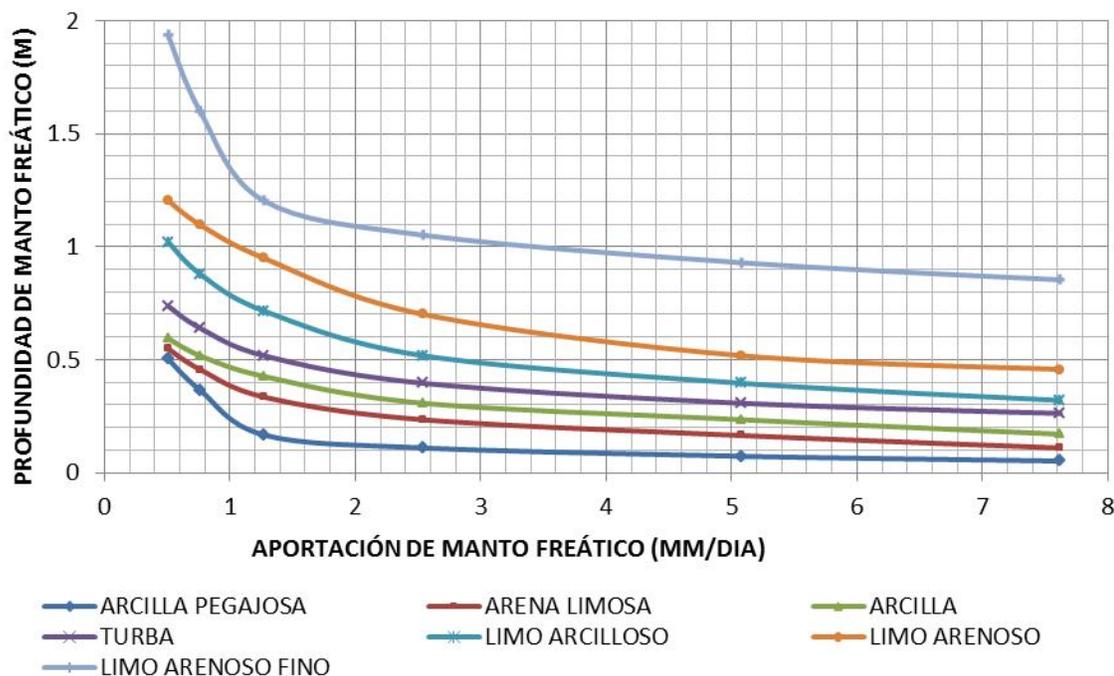
#### 5.7.1.6. Ajuste de requerimiento de riego por aportación de manto freático

La mayoría de los cultivos son afectados cuando el manto freático es superficial y se mantiene en el perfil del suelo humedecido por arriba de la capacidad de campo.

La caña es un cultivo que tolera altos niveles de humedad en el suelo y manto freático cercano a la zona radical; esto puede interpretarse como que la profundidad es del orden de un metro en suelos de medios a ligeros. La franja capilar es una zona casi saturada que se extiende por arriba del nivel del agua. El agua se mueve a esta zona por acción capilar. Las raíces del cultivo, por lo general, no penetran más de 30 cm en esta franja.

**Cuadro 5.33.** Aportaciones del manto freático a la zona de las raíces.

MES	PROFUNDIDAD DE MANTO FREÁTICO (m)	APORTACIÓN DE MANTO FREÁTICO (mm)
Ene.	1.08	23.56
Feb.	1.13	19.60
Mar.	1.20	15.50
Abr.	1.24	14.70
May.	1.30	12.09
Jun.	1.35	7.5
Jul.		
Ago.		
Sep.		
Oct.		
Nov.	0.96	38.10
Dic.	1.02	32.55
Total		163.55



**Ilustración 5.65.** Contribución de las aguas subterráneas a la rizósfera en mm/día.

Como el suelo es limo arenoso y la profundidad del manto freático en la parcela varía de 0.96 m, en noviembre, a 1.35, en junio, y tomando la profundidad de cada mes de acuerdo con la Ilustración 5.64. de aportaciones del manto freático a la zona de las raíces, se puede considerar que la aportación del manto freático es del orden de 163.5 mm en todo el año. Se consideró que en los cuatro meses de época de lluvia no hay aportaciones.

El requerimiento de riego correspondiente a la evapotranspiración, ajustado por lluvia aprovechable, fue 970.8 mm. Luego, se corrigió el requerimiento de riego por salinidad, calculándose con corrección por lámina de sobrerriego y quedó de 1,049.5 mm. Al ajustar, por aportación de manto freático, restándole los 163.5 mm estimados, quedan como requerimiento de riego 886.0 mm de lámina de agua.

#### 5.7.1.7. Eficiencias de riego

##### ¿Cuál es la eficiencia de riego?

La eficiencia de riego o de aplicación con el pivote fue:

$$ER = \frac{886.0}{1080.0} = 0.8203$$

### ¿Cuál fue la eficiencia de conducción?

El volumen extraído del pozo fue 886.905 millares de  $m^3$ , y el volumen servido en la parcela fue de 540 millares de  $m^3$ . Entonces, la eficiencia de conducción fue:

$$EC = \frac{540}{593} = 0.9106$$

$$EG = \frac{887 * 50 * 10000}{593 * 1000} = 0.7470$$

#### 5.7.1.8. Pérdidas de agua

¿Cuánto fueron las pérdidas?

Las pérdidas de agua en la conducción fueron:

$$PC = 593 - 540 = 53 \text{ Mm}^3$$

Las pérdidas de agua en la parcela con riego por aspersión fueron por evaporación y arrastre por viento:

$$P_{ave} = 540 - 442.982 = 97.018 \text{ Mm}^3$$

Las pérdidas de agua totales fueron:

$$PT = 97.018 + 53 = 150.018 \text{ Mm}^3$$

#### 5.7.1.9. Recomendaciones.

De acuerdo con la información obtenida de los indicadores de producción, los resultados son buenos y solo se requiere afinar el fertirriego para obtener producciones mayores.

Se puede mejorar revistiendo la regadera excavada en tierra para subir la eficiencia de conducción y se puede ajustar la velocidad del pivote para reducir la lámina aplicada y mejorar la eficiencia de aplicación. Debe tenerse cuidado de tomar en cuenta las condiciones de viento y humedad en tiempo real para no cometer el error de aplicar láminas de riego menores a las necesarias.

Deben realizarse mediciones de: gastos, niveles de humedad en el suelo, parámetros meteorológicos para calcular las necesidades de riego en tiempo real, rendimientos. Deben utilizarse para darle seguimiento a la productividad y a las eficiencias de riego, con la finalidad de seguir con al propósito de mejora continua.

### 5.7.2. Ejemplo de evaluación hidráulica de un sistema de riego de pivote central

A continuación se presentan las acciones que se desarrollaron para evaluar el sistema de riego por aspersión tipo pivote.

#### 5.7.2.1. Decisión y objetivos de la evaluación

Se decidió evaluar el sistema de riego porque el dueño quiso conocer el grado de desempeño del funcionamiento hidráulico y conocer los beneficios generados por la inversión.

Definición de objetivos. Obtener la uniformidad de aplicación del riego, el ahorro de agua y también acciones de mejora. Considerando dos velocidades de avance de la tubería regante, la acostumbrada por el productor y otra mayor para conocer su efecto en la lámina aplicada.

El dueño del predio concertó con un evaluador la ejecución de la evaluación.

#### 5.7.2.2. Planeación de la evaluación

El proceso de evaluación se desarrolló siguiendo el plan de trabajo, que se anota a continuación:

- Obtención de la información del predio y del sistema de riego.
- Análisis de documentos y de la información.
- Visita preliminar al sistema de riego.
- Definir los parámetros para evaluar el sistema de riego.
- Proyectar la prueba de uniformidad de lluvia.
- Diseñar la retícula o malla de pluviómetros.
- Proyectar el tiempo de riego de la prueba de uniformidad de lluvia.
- Proyectar la prueba de uniformidad hidráulica.
- Preparación de materiales y dispositivos.
- Ejecutar de trabajos de campo.
- Hacer el análisis y obtener los resultados.
- Establecer las conclusiones.
- Elaborar las recomendaciones.

### 5.7.2.3. Obtención de la información del predio

El evaluador procedió a la obtención de la información básica de los archivos y de la entrevista con el responsable del sistema de riego, y obtuvo lo siguiente: datos generales, datos de la fuente de abastecimiento, información del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo y datos del sistema de riego por aspersión.

**Cuadro 5.34.** Datos del predio, del usuario, del tipo de tenencia, superficie y localidad.

DATOS GENERALES	
Nombre	Agropecuaria El Toro
Nombre del predio o campo:	El Forrajero
Nombre del técnico:	Martín Gutierrez Campos
Tipo de tenencia:	Propiedad Privada
Superficie (ha):	40
Localidad:	Cosío
Municipio:	Cosío
Entidad Federativa:	Aguascalientes

**Cuadro 5.35.** Datos de la fuente de abastecimiento.

DATOS DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO	
Gasto total al inicio (l/s):	56.29
Presión en el cabezal de control (kg/cm <sup>2</sup> )	3.7

**Cuadro 5.36.** Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.

DATOS DEL CULTIVO, PENDIENTE Y DEL SUELO	
Cultivo:	Triticale
Fecha de siembra o años de plantación:	15-12-2009
Pendiente del terreno (%):	2%
Textura del suelo:	Franco arenoso

**Cuadro 5.37.** Datos del sistema de riego por aspersión.

DATOS DEL SISTEMA POR ASPERSIÓN	
Longitud de la tubería regante (m)	355
Número de torres del sistema	6
Espaciamiento entre torres (m)	56
Número de emisores en el pivote (m)	129
Presión en el aspersor (kg/cm <sup>2</sup> )	3.5
Duración del riego (h)	36

#### 5.7.2.4. Análisis de documentos e información

De acuerdo con los datos del usuario, considerando 56.29 l/s de gasto disponible, área regada 40 ha, regando 36 h por revolución y suponiendo eficiencia de 0.85, haciendo los cálculos necesarios, se puede aplicar una lámina de 1.82 cm.

#### 5.7.2.5. Visita preliminar

En la visita preliminar se realizaron las acciones que se presentan a continuación:

Se localizó el predio, se hizo la inspección visual del sistema de riego y además se conoció el procedimiento de su operación.

Se encontró que no hay pérdidas por almacenamiento y por conducción, por lo que los factores que influyen en la eficiencia global del sistema de riego, las pérdidas por arrastre y evaporación y las pérdidas por uniformidad de lluvia.

Medición de gasto (37.13 l/s) y presión (3.5 k/cm<sup>2</sup>) en el cabezal del sistema de riego.

Verificación de longitud de tubería regante y entre torres de la tubería regante.

#### 5.7.2.6. Definición de parámetros de la evaluación

Se analizaron los parámetros para evaluar el sistema de riego y son los siguientes:

Eficiencia estadística de la aspersion o uniformidad de lluvia. Se requiere usar la uniformidad de lluvia ponderando las áreas dominadas por cada anillo de superficie regada y para esto se utiliza el coeficiente de uniformidad para pivotes centrales.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica. Este parámetro no se utiliza porque la tubería regante se diseña con gasto variable en los aspersores proporcional al área que riegan, y generalmente con reguladores de presión.

Eficiencia de aplicación.

Eficiencia global del sistema de riego.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

#### 5.7.2.7. Prueba de uniformidad de lluvia

Los trabajos desarrollados fueron los siguientes: prueba de uniformidad de lluvia, mediciones de campo y resultados,

- Línea de pluviómetros

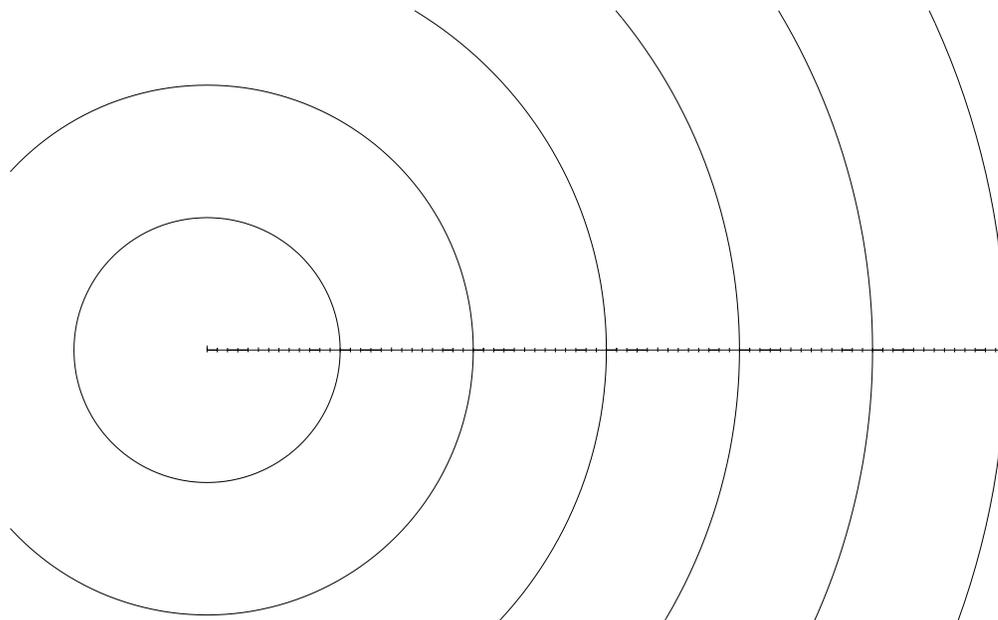
Se diseñó la línea de los pluviómetros de la siguiente manera:

Se seleccionó el espacio comprendido entre dos torres (59.16 m) para la instalación de pluviómetros y se determinó como 13 el número de recipientes, espaciados a 4.55 m. En el campo en el primer tramo se instalaron 11 pluviómetros y en los demás se instalaron 13, integrando un total de 76 recipientes.

**Cuadro 5.38.** Tramo definido por número de torre y la cantidad de pluviómetros entre torres.

TRAMO	NÚMERO DE PLUVIÓMETROS
1 – 2	11
2 – 3	13
3 – 4	13
4 – 5	13
5 – 6	13
6 – 7	13
<b>Total</b>	<b>76</b>

Cada pluviómetro debe estar en un punto del radio medio del área con forma de anillo que representará. Si el espaciamiento entre pluviómetros es 4.55 m. entonces el punto de ubicación debe estar a una distancia del centro (pivote) igual al radio menor del anillo más la mitad de 4.55. No deben instalarse pluviómetros muy pegados a las torres del sistema de riego.



**Ilustración 5.66.** Línea de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersion.

- Mediciones de campo y resultados

Para realizar las mediciones de campo de las pruebas de uniformidad de lluvia y de distribución hidráulica, se llevaron los siguientes materiales y dispositivos:

Cintas métricas (metálica de 5 metros, de plástico de 50 metros).  
 Estacas metálicas para marcar la línea en campo.  
 Medidor de gasto portátil.  
 Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa).  
 Tubo de pitot, manguera flexible para conectar manómetros.  
 Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 metros de longitud.  
 Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.  
 Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones del orden de 2 a 10 ml por marca.  
 Cronómetro.  
 Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.  
 Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves estilson y perica).  
 Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el bordo delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.

Se procedió a instalar los pluviómetros en la línea marcada, se fijaron en las estacas para evitar que se voltearan los recipientes en las distancias proyectadas.

**Cuadro 5.39.** Datos de tiempos de la prueba.

CONCEPTO	TIEMPO (horas y min)
Hora de inicio de la prueba:	12:32
Hora final de la prueba:	14:15
Tiempo de riego	01:43

Se operó el sistema de riego durante una hora y 43 minutos para que la lluvia pasara sobre todos los botes y se captaron los volúmenes de agua que se muestran en el cuadro 3.40.:

**Cuadro 5.40.** Volúmenes de agua captados en la prueba de aspersión.

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm <sup>3</sup>	LÁMINA mm	DI*LI	LI- LMPOND	L LI-LM L	DI*L LI-LM L
3	70	7.571	22.713	-8.433	8.433	25.298
4	195	21.090	84.361	5.087	5.087	20.347
5	145	15.682	78.412	-0.321	0.321	1.605
6	238	25.741	154.445	9.737	9.737	58.424
7	120	12.979	90.850	-3.025	3.025	21.174
8	110	11.897	95.176	-4.106	4.106	32.852

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm <sup>3</sup>	LÁMINA mm	DI*LI	LI- LMPOND	L LI-LM L	DI*L LI-LM L
9	95	10.275	92.472	-5.729	5.729	51.559
10	215	23.253	232.533	7.250	7.250	72.498
11	226	24.443	268.873	8.440	8.440	92.835
12	160	17.305	207.657	1.301	1.301	15.615
13	122	13.195	171.534	-2.809	2.809	36.512
14	130	14.060	196.842	-1.943	1.943	27.207
15	55	5.949	89.228	-10.055	10.055	150.825
16	195	21.090	337.443	5.087	5.087	81.387
17	40	4.326	73.545	-11.677	11.677	198.514
18	155	16.764	301.752	0.761	0.761	13.689
19	110	11.897	226.044	-4.106	4.106	78.023
20	220	23.794	475.881	7.791	7.791	155.811
21	160	17.305	363.400	1.301	1.301	27.327
22	130	14.060	309.323	-1.943	1.943	42.754
23	195	21.090	485.075	5.087	5.087	116.994
24	225	24.335	584.036	8.331	8.331	199.952
25	180	19.468	486.697	3.464	3.464	86.609
26	115	12.438	323.383	-3.566	3.566	92.708
NUM ORDEN	VOLÚMENES cm <sup>3</sup>	LÁMINA mm	DI*LI	LI- LMPOND	L LI-LM L	DI*L LI-LM L
27	145	15.682	423.426	-0.321	0.321	8.668
28	125	13.519	378.542	-2.484	2.484	69.556
29	85	9.193	266.602	-6.810	6.810	197.500
30	210	22.713	681.376	6.709	6.709	201.271
31	65	7.030	217.932	-8.973	8.973	278.176
32	145	15.682	501.839	-0.321	0.321	10.273
33	100	10.815	356.911	-5.188	5.188	171.204
34	125	13.519	459.658	-2.484	2.484	84.461
35	130	14.060	492.105	-1.943	1.943	68.018
36	180	19.468	700.844	3.464	3.464	124.718
37	228	24.659	912.395	8.656	8.656	320.265
38	230	24.876	945.274	8.872	8.872	337.141
39	140	15.142	590.526	-0.862	0.862	33.611
40	140	15.142	605.667	-0.862	0.862	34.473
41	120	12.979	532.122	-3.025	3.025	124.022
42	190	20.549	863.076	4.546	4.546	190.929
43	170	18.386	790.612	2.383	2.383	102.462
44	155	16.764	737.616	0.761	0.761	33.462
45	160	17.305	778.715	1.301	1.301	58.558

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm <sup>3</sup>	LÁMINA mm	DI*LI	LI- LMPOND	L LI-LM L	DI*L LI-LM L
46	195	21.090	970.149	5.087	5.087	233.988
47	140	15.142	711.659	-0.862	0.862	40.505
48	155	16.764	804.672	0.761	0.761	36.504
49	190	20.549	1006.922	4.546	4.546	222.750
50	285	30.824	1541.207	14.821	14.821	741.032
51	165	17.846	910.123	1.842	1.842	93.945
52	110	11.897	618.646	-4.106	4.106	213.536
53	105	11.356	601.882	-4.647	4.647	246.304
54	130	14.060	759.247	-1.943	1.943	104.942
55	125	13.519	743.565	-2.484	2.484	136.628
56	160	17.305	969.068	1.301	1.301	72.872
57	165	17.846	1017.197	1.842	1.842	104.997
58	105	11.356	658.663	-4.647	4.647	269.540
59	120	12.979	765.737	-3.025	3.025	178.470
60	225	24.335	1460.091	8.331	8.331	499.881
61	215	23.253	1418.451	7.250	7.250	442.238
62	262	28.337	1756.868	12.333	12.333	764.651
63	148	16.007	1008.436	0.003	0.003	0.216
64	70	7.571	484.534	-8.433	8.433	539.690
65	100	10.815	703.007	-5.188	5.188	337.221
66	110	11.897	785.204	-4.106	4.106	271.027
NUM ORDEN	VOLÚMENES cm <sup>3</sup>	LÁMINA mm	DI*LI	LI- LMPOND	L LI-LM L	DI*L LI-LM L
67	155	16.764	1123.188	0.761	0.761	50.954
68	235	25.416	1728.315	9.413	9.413	640.077
69	155	16.764	1156.716	0.761	0.761	52.475
70	145	15.682	1097.772	-0.321	0.321	22.473
71	95	10.275	729.505	-5.729	5.729	406.744
72	100	10.815	778.715	-5.188	5.188	373.537
73	150	16.223	1184.296	0.220	0.220	16.040
74	162	17.521	1296.561	1.518	1.518	112.302
75	105	11.356	851.720	-4.647	4.647	348.543
76	70	7.571	575.384	-8.433	8.433	640.882
77	115	12.438	957.711	-3.566	3.566	274.558
78	130	14.060	1096.690	-1.943	1.943	151.583
<b>3078</b>			49258.81			12790.39
		Lmedpond	16.0035			0.2597
				Coeficiente de uniformidad pivote		74.03

Con la finalidad de interpretar directamente los resultados, se calcularon las láminas aplicadas dividiendo los volúmenes captados (mililitros o centímetros cúbicos) entre el área de los botes (centímetros cuadrados), se obtuvo la lámina (cm) que se captó de la lluvia.

- Análisis de resultados

Coeficiente de uniformidad para pivotes (CUP).

$$CUP = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |V_i - V_m|}{\sum_{i=1}^n V_i * D_i} \right) * 100$$

Donde.

CUP – Coeficiente de uniformidad de Christiansen adaptado a pivotes.

$V_i$  –Volumen captado en el recipiente  $i$ ésimo (cc) o lámina correspondiente (mm).

$V_m$  –Volumen medio ponderado captado en la muestra (cc) o lámina correspondiente (mm).

$D_i$  – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación  $i$ , o también la posición ocupada por el pluviómetro  $i$ , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y  $n$  el más alejado ( $m^2$ ).

$n$  – Número de recipientes de captación.

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se usó hoja de cálculo y los resultados son los siguientes:

**Cuadro 5.41.** Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia.

CONCEPTO	VALOR
Media (cm/h)	16.0035
Coeficiente de uniformidad para pivotes centrales	74.03

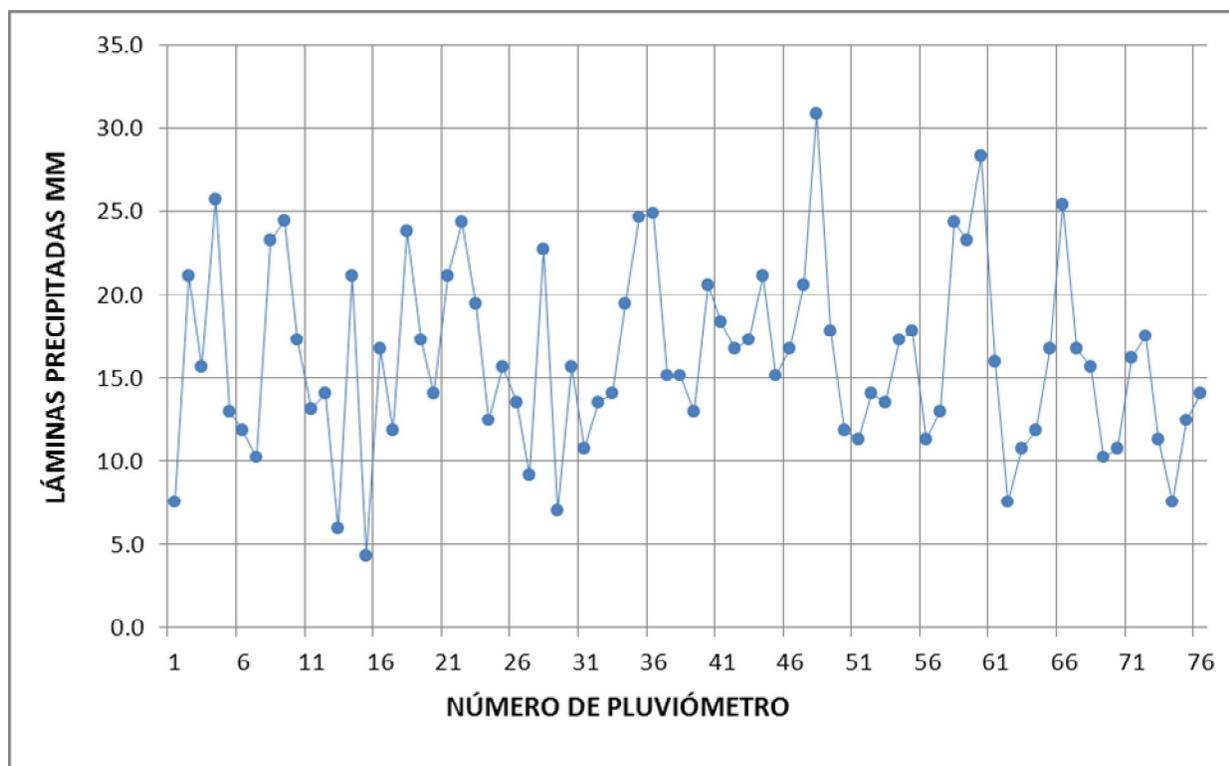
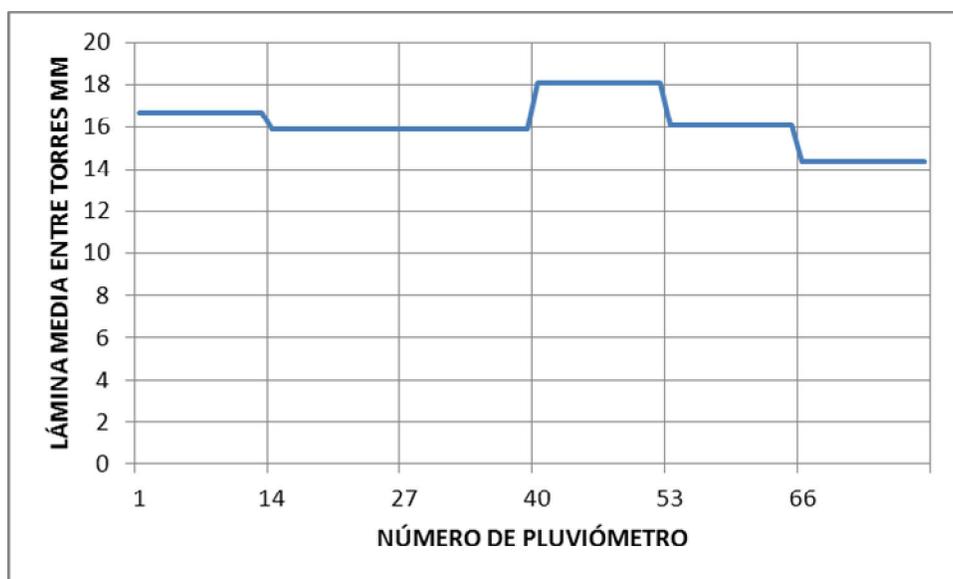


Ilustración 5.66. Láminas precipitadas por revolución de 36 horas.

Cuadro 5.42. Láminas medias aritméticas captadas entre los tramos de las torres, diferencia con la media y condición de riego.

NO. DE ORDEN POR TRAMO	LÁMINA MEDIA MM	DIFERENCIA CON LA MEDIA DEL PIVOTE MM	CONDICIÓN DE RIEGO
1	16.676	0.529	EXCEDIDA
2	15.809	-0.338	DEFICIENTE
3	15.874	-0.272	DEFICIENTE
4	18.095	1.949	EXCEDIDA
5	16.057	-0.090	DEFICIENTE
6	14.368	-1.779	DEFICIENTE
<b>MEDIA</b>	16.146	0.0	



**Ilustración 5.67.** Láminas medias precipitadas entre torres.

**Cuadro 5.23.** Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia del pivote

CONCEPTO	VALOR
Media ponderada(mm)	16.0035
Coefficiente de variación estadístico para pivotes (%)	0.3327
Coefficiente de uniformidad estadística para pivotes (%) o Eficiencia estadística (1-CV)	66.73

#### 5.7.2.8. Recomendaciones

Primera opción. Revisar el sistema de filtrado para asegurarse que las diferencias de precipitación no se deban a obstrucción de aspersores y si hay obstrucciones deberá ponerse un sistema de filtrado para evitar los taponamientos y efectuar la limpieza de los aspersores. En el caso de que no haya obstrucciones en los aspersores, deberá aplicarse el procedimiento de la segunda opción.

Segunda opción. Se recomienda poner los pluviómetros en los mismos sitios y repetir la prueba otras dos veces, sumar los volúmenes captados y hacer el análisis de los resultados, con la finalidad de obtener el efecto de compensación que se presenta generalmente en sistemas de riego por aspersión móviles, causado por las diferencias de precipitación en los mismos sitios, y verificar si mejoró la uniformidad. En el caso de que no mejoró, aplicar la tercera opción.

Tercera opción. Entre la tercera y la cuarta torre, la media de la precipitación es mayor que la lámina media del pivote por lo que debe instalarse boquillas de menor gasto para tratar de igualar las láminas de riego y en el caso de los aspersores entre las torres penúltima y la última debe aumentarse el gasto de los aspersores para igualar la lámina de riego, porque la lámina de riego es menor que la media del pivote. Estas acciones debe realizarlas un profesional de la empresa que instaló el sistema de riego, verificando el funcionamiento hidráulico de los aspersores aforando en los tramos que se detectaron problemas, porque debe cumplir las especificaciones de proyecto y hacer los ajustes necesarios..

### *5.7.3. Ejemplo de evaluación de un sistema de riego por aspersión portátil manual*

A continuación se presentan las acciones que se desarrollaron para evaluar el sistema de riego por aspersión.

#### 5.7.3.1. Decisión y objetivos de la evaluación

Se decidió evaluar el sistema de riego porque el dueño recibió apoyo económico para la adquisición e instalación del sistema de riego y quiso evaluarlo para conocer los beneficios generados por la inversión al cambiar de método de riego.

Definición de objetivos. Obtener la productividad del agua, la uniformidad de aplicación, el ahorro de agua y de energía y también acciones de mejora posibles.

El dueño del predio concertó con un evaluador la ejecución de la evaluación.

#### 5.7.3.2. Planeación de la evaluación

El proceso de evaluación se desarrolló siguiendo el plan de trabajo, que se anota a continuación:

Obtención de la información del predio y del sistema de riego.

Análisis de documentos y de la información.

Visita preliminar al sistema de riego.

Definir los parámetros para evaluar el sistema de riego.

Proyectar la prueba de uniformidad de lluvia.

Diseñar la retícula o malla de pluviómetros.

Proyectar el tiempo de riego de la prueba de uniformidad de lluvia.

Proyectar la prueba de uniformidad hidráulica.

Preparación de materiales y dispositivos.

Ejecución de trabajos de campo.

Resultados y análisis.

Conclusiones.  
Recomendaciones.

### 5.7.3.3. Obtención de la información del predio

El evaluador procedió a la obtención de la información básica de los archivos y de la entrevista con el responsable del sistema de riego, y obtuvo lo siguiente:

**Cuadro 5.44.** Datos generales del predio, propietario y evaluador.

DATOS GENERALES	
Nombre	<i>Liberto Zavala Ramírez</i>
Nombre del predio o campo:	<i>El Forrajero</i>
Nombre del técnico:	<i>Martín Rubio Moreno</i>
Tipo de tenencia:	<i>Propiedad Privada</i>
Superficie (ha):	15
Localidad:	<i>Ojo de agua</i>
Municipio:	<i>El Llano</i>
Entidad Federativa:	<i>Aguascalientes</i>

**Cuadro 5.45.** Datos de la fuente de abastecimiento.

DATOS DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO	
Gasto total al inicio (l/s):	6.5
Presión en el cabezal de control (kg/cm <sup>2</sup> )	4.5

**Cuadro 5.46.** Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.

DATOS DEL CULTIVO, PENDIENTE Y DEL SUELO	
Cultivo:	<i>Alfalfa</i>
Fecha de siembra o años de plantación:	3 años
Pendiente del terreno (%):	1%
Textura del suelo:	<i>Franco arcillo arenoso</i>

**Cuadro 5.47.** Datos del sistema de riego por aspersión.

DATOS DEL SISTEMA POR ASPERSIÓN	
Longitud de distribuidor (m)	82,8
Número de regantes en el distribuidor	2
Espaciamiento entre regantes (m)	12
Espaciamiento entre emisores (m)	9

DATOS DEL SISTEMA POR ASPERSIÓN	
Presión en la UCA (kg/cm <sup>2</sup> )	3.5
Longitud de la regante (m)	90
Número de emisores	10
Presión en el aspersor (kg/cm <sup>2</sup> )	2.5
Duración del riego (h)	9

#### 5.7.3.4. Análisis de documentos e información

De acuerdo con los datos del usuario, considerando 6.5 l/s de gasto disponible, área por aspersor 108 m<sup>2</sup>, regando las 24 h por día incluyendo los movimientos de las tuberías regantes, y suponiendo eficiencia de 0.85, haciendo los cálculos necesarios, se puede dominar en época de máxima demanda del orden de 9 ha. En invierno considerando la demanda mínima, se podría regar 18 ha.

#### 5.7.3.5. Visita preliminar

En la visita preliminar se realizaron las acciones que se presentan a continuación:

Se localizó el predio, se hizo la inspección visual del sistema de riego y además se conoció el procedimiento de su operación.

Se encontró que no hay pérdidas por almacenamiento y por conducción, por lo que los factores que influyen en la eficiencia global del sistema de riego, son la uniformidad hidráulica del sistema, las pérdidas por arrastre y evaporación y las pérdidas por uniformidad de lluvia.

Medición de gasto (4.9 l/s) y presión (4.5 k/cm<sup>2</sup>) en el cabezal del sistema de riego.

Verificación de espaciamientos entre aspersores y entre tuberías regantes.

#### 5.7.3.6. Definición de parámetros de la evaluación

Se definieron los parámetros para evaluar el sistema de riego, que son los siguientes:

Eficiencia estadística de la aspersión o uniformidad de lluvia.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica.

Eficiencia de aplicación.

Eficiencia global del sistema de riego.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

### 5.7.3.7. Trabajos desarrollados

Se realizaron los trabajos de campo para determinar la eficiencia estadística de la aspersión o uniformidad de lluvia, la uniformidad de distribución hidráulica, la eficiencia de aplicación, la eficiencia global del sistema de riego y las pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

#### 5.7.3.7.1. Prueba de uniformidad de lluvia

- Retícula o malla.

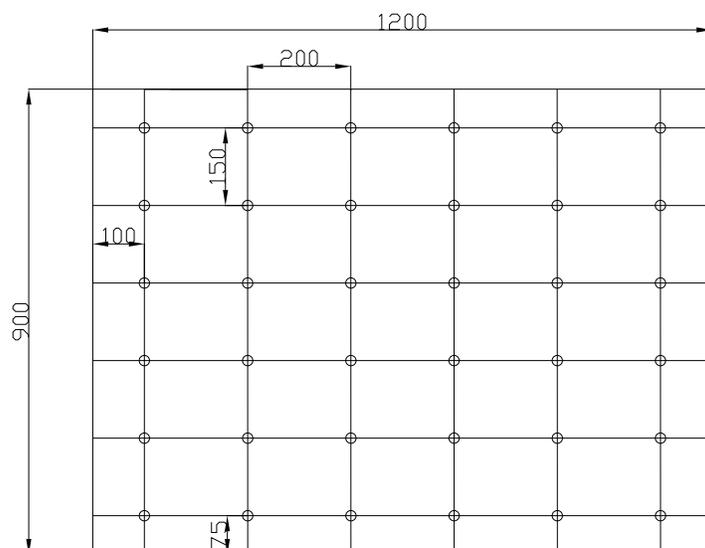
Se diseñó la retícula o malla para la instalación de los pluviómetros de la siguiente manera:

Se seleccionó el área comprendida entre cuatro aspersores de dos tuberías trabajando simultáneamente y se seleccionó 36 como el número de observaciones, para obtener 6 líneas de pluviómetros entre los aspersores y 6 líneas entre las dos tuberías.

Cada pluviómetro debe estar al centro del área que representa, en este caso corresponde a rectángulos que se forman de la siguiente forma:

Espaciamiento entre aspersores = 9 m. y como son 6 pluviómetros, la separación entre recipientes corresponde a  $9/6$ , que es 1.5 m. y son 6 espaciamentos de esa dimensión y dos de 0.75 m. en las orillas, entre el pluviómetro y la línea de aspersores. Entonces un lado del rectángulo de área representada por el pluviómetro es 1.5 m.

Espaciamiento entre tuberías regantes = 12 m. y como son 6 pluviómetros, la separación entre recipientes corresponde a 2 m. y en las orillas queda 1.0 m. entre el pluviómetro y la tubería regante. Entonces el otro lado del rectángulo de área representada por el pluviómetro es 2.0 m. En la Ilustración 5.68. se presenta la retícula o malla de puntos de ubicación de los recipientes.



**Ilustración 5.18.** Retícula de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersión.

- **Materiales y dispositivos**

Para realizar las mediciones de campo de las pruebas de uniformidad de lluvia y de distribución hidráulica, se utilizaron los siguientes materiales y dispositivos:

Cintas métricas (metálica de 5 metros, de plástico de 50 metros).

Estacas metálicas o de madera para marcar la retícula en campo.

Medidor de gasto portátil.

Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa).

Tubo de pitot, manguera flexible para conectar manómetros.

Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 metros de longitud.

Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.

Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones mínimas del orden de 2 a 10 ml.

Cronómetro.

Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.

Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves estilson y perica).

Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el bordo delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.

- **Actividades realizadas en la prueba.**

Se seleccionó el sitio de muestreo en la parte final de las tuberías, para captar las cantidades menores de agua que corresponden a las láminas de riego mínimas.

Se procedió a instalar los pluviómetros en la retícula marcada, se fijaron en estacas para evitar que se voltearan los recipientes.

**Cuadro 5.48.** Tiempos de la prueba.

CONCEPTO	CANTIDAD / UNIDAD	
Hora de inicio de la prueba: (horas y minutos)	12	20
Hora del final de la prueba: (horas y minutos)	14	20
Tiempo total de la prueba: (hora decimal)	2.0	

Se operó el sistema de riego durante dos horas para captar los volúmenes de agua en los recipientes y se muestran en el cuadro 5.49.

**Cuadro 5.49.** Volúmenes de agua captados en dos horas de pruebas de aspersión.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5	6
1	109	93	57	60	91	106
2	103	92	52	54	90	102
3	89	88	48	50	86	87
4	94	100	44	48	98	92
5	106	104	46	50	102	106
6	109	107	50	52	102	108

Con la finalidad de interpretar directamente los resultados, se calcularon las láminas aplicadas dividiendo los volúmenes captados (mililitros o centímetros cúbicos) entre el área de los botes (centímetros cuadrados), se obtuvo la lámina (cm) que se captó de la lluvia durante dos horas y dividiendo los datos entre dos, se obtienen los correspondientes a una hora de precipitación, los resultados se muestran en el Cuadro 5.50.

**Cuadro 5.50.** Datos de la precipitación captada transformados a mm/h.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5	6
1	0.86	0.73	0.45	0.47	0.71	0.83
2	0.81	0.72	0.41	0.43	0.70	0.80
3	0.70	0.69	0.38	0.40	0.67	0.68
4	0.74	0.78	0.35	0.38	0.77	0.72
5	0.83	0.81	0.36	0.40	0.80	0.83
6	0.86	0.84	0.40	0.41	0.80	0.85

- Análisis de la uniformidad de lluvia

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se usó hoja de cálculo y los resultados son los siguientes:

**Cuadro 5.51.** Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia

CONCEPTO	VALOR
Media (cm/h)	0.649
Desviación Estándar (cm)	0.184
C.V. (coeficiente de variación)	0.284
Eficiencia estadística (1-CV)	0.716
Rango (cm)	0.507

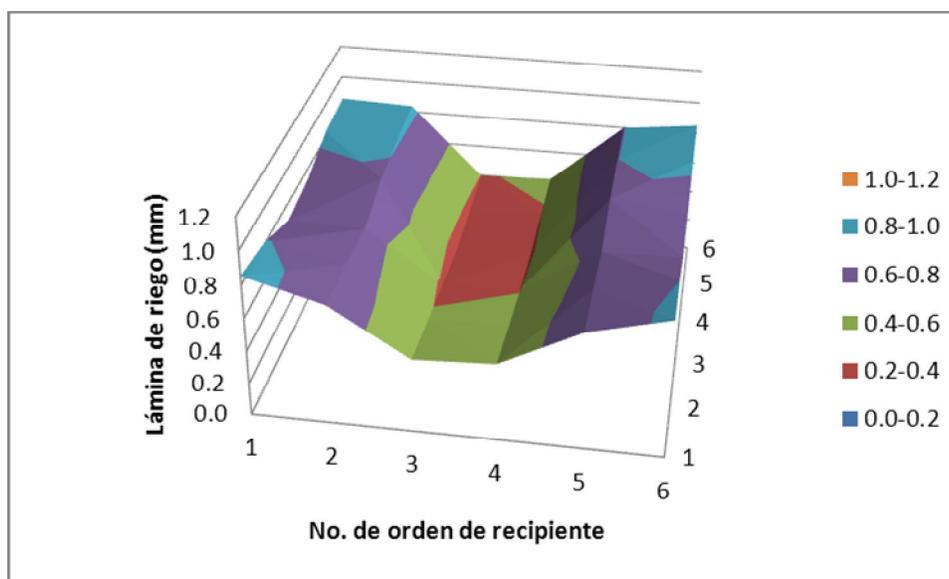
La lámina precipitada horaria: fue 0.65 cm/h.

El cálculo del coeficiente de variación de la lluvia se realizó dividiendo la desviación estándar entre la media y la eficiencia estadística, restando de uno el coeficiente de variación. Los datos se observan en el cuadro de parámetros estadísticos.

Como el coeficiente de variación es 0.284 por lo que se considera que la uniformidad de lluvia es baja y esto se refleja en la eficiencia estadística, que fue 0.716, por abajo del límite del indicador recomendado, que el valor 0.8 es el mínimo aceptable.

Se comprueba que la uniformidad baja, porque el rango es mayor que la mitad de la media.

En la gráfica de los datos de lluvia se observa que a lo largo de las tuberías regantes, o sea del espaciamiento más corto entre aspersores, el traslape permite regar más parejo. Contrario a esto, a la mitad de las dos tuberías se observa una franja con láminas de riego muy pequeñas (franja de líneas 3 y 4), por lo que se deduce que el espaciamiento entre las tuberías regantes fue grande para el tipo de aspersor o para la presión de operación del aspersor.



**Ilustración 5.69.** Láminas precipitadas por hora con espaciamientos de 9 m por 12m.

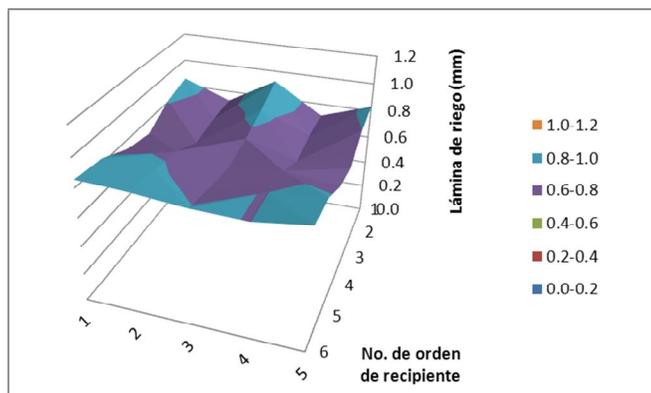
- Simulación de traslape

Con la información de la lluvia se simuló un traslape de los recipientes de las líneas 3 y 4, quedando la el reporte de láminas precipitadas como se presenta a continuación.

**Cuadro 5.52.** Láminas captadas simulando el traslape, cerrando las tuberías a 9 m. de espaciamiento.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5
1	0.86	0.73	0.93	0.71	0.83
2	0.81	0.72	0.84	0.70	0.80
3	0.70	0.69	0.78	0.67	0.68
4	0.74	0.78	0.73	0.77	0.72
5	0.83	0.81	0.76	0.80	0.83
6	0.86	0.84	0.81	0.80	0.85

En la gráfica correspondiente, se observa que el rango de valores se redujo y que mejoró la uniformidad de lluvia, porque se ve más pareja la superficie de láminas precipitadas. Aunque en la línea de traslape se aplican las láminas mayores.



**Ilustración 5.70.** Láminas precipitadas con traslape 9 m, por 9 m.

Para confirmar la apreciación gráfica, en el cuadro de datos estadísticos se observa que la lámina precipitada horaria se incrementó a 0.78 cm/h, la desviación estándar se mejoró porque se redujo la dispersión de datos y el coeficiente de variación se redujo prácticamente a 0.082 y por lo tanto, le eficiencia estadística fue de 0.918. Al ser superior a 0.800, indica que es buena la nueva distribución del agua y que se reducen las pérdidas de agua por falta de uniformidad de lluvia. Esto indica que una solución aceptable es reducir el espaciamiento entre las tuberías regantes a 9 m. Otra solución sería cambiar la boquilla de los aspersores de manera que el diámetro de cobertura fuera 24 m. (con el mismo gasto de entrada en las tuberías regantes). Esto también mejoraría el traslape entre las regantes.

**Cuadro 5.53.** Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia considerando traslape de 9m. por 9m.

CONCEPTO	VALOR	
Media (cm/h)	0.639	0.779
Desviación Estándar (cm)	0.139	0.064
C.V. (coeficiente de variación)	0.218	0.082
Eficiencia estadística (1-CV)	0.782	0.918
Rango (cm)	0.37	0.252

### 5.7.3.7.2. Prueba de uniformidad de distribución hidráulica

Como el sistema de riego por aspersión opera con dos tuberías regantes y cada una de estas con 10 aspersores, además considerando que se sugiere un tamaño de muestra de 16 aforos, se decidió medir el gasto de todos los aspersores.

Se escogió el tiempo de aforo de 36 segundos, para que al multiplicar por 100 los litros captados en ese lapso de tiempo, se obtuvieran litros por hora suministrados por el aspersor. Que considerando la combinación de errores en la medición, es decir captando agua un segundo antes y un segundo después de lo programado, se fallaría aproximadamente en un 5.5 % con respecto a la media de volúmenes captados.

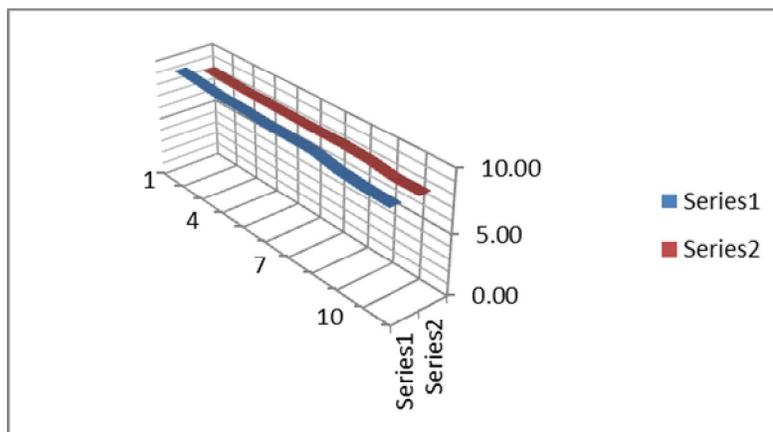
Los datos de los volúmenes obtenidos en los aforos se presentan en los cuadros 5.54. y 5.55.

**Cuadro 5.54.** Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (1) en 36 segundos de flujo.

VOLÚMENES CAPTADOS EN 36 S.			
TUBERÍA REGANTE 1			
No. De Orden	Rep. 1	Rep. 2	Media
1	9.45	9.30	9.38
2	9.25	9.15	9.20
3	8.95	9.00	8.98
4	8.93	9.07	9.00
5	8.85	8.83	8.84
6	8.81	8.78	8.80
7	8.75	8.85	8.80
8	8.45	8.35	8.40
9	8.29	8.16	8.23
10	8.20	8.10	8.15

**Cuadro 5.55.** Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (2) en 36 segundos de flujo.

VOLÚMENES CAPTADOS EN 36 S.			
TUBERÍA REGANTE 2			
No. De Orden	Rep. 1	Rep. 2	Media
1	8.64	8.64	8.64
2	8.57	8.5	8.54
3	8.48	8.38	8.43
4	8.46	8.46	8.46
5	8.42	8.40	8.41
6	8.38	8.36	8.37
7	8.35	8.4	8.38
8	8.28	8.3	8.29
9	8.1	7.9	8.00
10	8.05	8	8.03



**Ilustración 5.71.** Volúmenes captados en los aforos de todos los aspersores de las dos tuberías.

Se ordenaron los datos de mayor a menor, se calculó la media general, luego la media del cuarto bajo (5 valores menores) y por último la eficiencia de distribución hidráulica, dividiendo la media del cuarto bajo entre la media general.

**Cuadro 5.56.** Volúmenes captados ordenados de mayor a menor.

DATOS ORDENADOS	
VOLUMEN (L/36S)	GASTO (l/s)
9.38	0.260
9.20	0.256
9.00	0.250
8.98	0.249
8.84	0.246
8.80	0.244
8.80	0.244
8.64	0.240
8.54	0.237
8.46	0.235
8.43	0.234
8.41	0.234
8.40	0.233
8.38	0.233
8.37	0.233
8.29	0.230
8.23	0.228
8.15	0.226
8.03	0.223
8.00	0.222

Los resultados se muestran a continuación en el cuadro 5.58.

**Cuadro 5.57.** Parámetros de la prueba de uniformidad de distribución hidráulica.

CONCEPTO	VALOR
Media general	0.238
Media del cuarto bajo	0.226
Eficiencia de distribución hidráulica	0.95

La eficiencia de distribución hidráulica es excelente, por lo que el sistema de riego opera dentro de los límites de aceptación del proyecto, también indica que la diferencia de descargas entre los aspersores y el de menor gasto, en su mayoría no rebasa el 10 %.

### 5.7.3.7.3. Pérdidas por arrastre y evaporación

La lámina suministrada por los aspersores en la zona de la prueba menos la lámina precipitada horaria captada en los pluviómetros, corresponde a la lámina perdida por hora de operación y se obtuvo de la manera siguiente:

**Cuadro 5.58.** Datos para el cálculo del cuarto bajo.

NO. ASPERSOR	GASTO (l/s)
1	0.228
2	0.226
3	0.223
4	0.222
<b>Media</b>	<b>0.225</b>

El gasto de 0.225 l/s en una hora aplica un volumen de 810 litros o  $0.810 \text{ m}^3$ , que divididos entre  $108 \text{ m}^2$  da una lámina suministrada horaria de 7.5 mm/h.

Pérdida por arrastre y evaporación horaria =  $7.5 - 6.4 = 1.1 \text{ mm/h}$ .

La eficiencia por arrastre y evaporación es el cociente de dividir la lámina captada entre la lámina suministrada, entonces queda:  $6.4 / 7.5 = 0.853$

#### 5.7.3.7.4. Análisis de la información de los trabajos de campo

Eficiencia estadística = 0.782.

Eficiencia de distribución hidráulica = 0.950.

Eficiencia de arrastre y evaporación = 0.853.

A continuación se presenta el cuadro resumen de los cálculos desarrollados en la evaluación del sistema de riego.

**Cuadro 5.59.** Cuadro resumen de datos calculados en la evaluación del sistema de riego por aspersión.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	$RR$		6	
Eficiencia estadística	$1-CV$	0.782		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		7.67	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			1.67
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	$Eeya$	0.853		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		8.99	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			1.32
Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	$Eudh$	0.95		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eudh$		9.47	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.47
Suma pérdidas (SP)				3.47
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.63		

La eficiencia global de 0.63 obtenida del producto de las tres eficiencias parciales o del cociente de dividir la lámina de requerimiento de riego entre la lámina bruta total, resultó muy baja, por lo que es necesario corregir el traslape y cambiar boquillas a los aspersores

con mayor alcance y con el mismo gasto, o haciendo el ajuste de gastos y presiones necesarios para no bajar la eficiencia de distribución hidráulica.

#### 5.7.3.7.5. Análisis de simulación de riego con traslape mejorado (9\*9)

Para conocer los beneficios de hacer la mejora de traslapes de las tuberías regantes, se usaron los datos de la simulación del traslape y se obtuvieron los resultados siguientes:

El tiempo de riego con el traslape propuesto corresponde a el cociente de dividir 6 cm de la lámina de proyecto entre 0.77 cm/h que es la nueva intensidad de aplicación con el traslape, y resultó de 7.79 horas, o sea prácticamente 8 horas.

El gasto de 0.225 l/s en una hora aplica un volumen de 810 litros o 0.810 m<sup>3</sup>, que divididos entre 81 m<sup>2</sup> da una lámina suministrada horaria de 10 mm/h.

Como la pérdida por arrastre y evaporación horaria es de 1.1 mm/h., la lámina que se precipitaría ahora sería 10.0 mm/h menos las pérdidas por arrastre y evaporación que son 1.1 mm/h, por lo que la lámina precipitada horaria sería de 8.9 mm/h.

La eficiencia por arrastre y evaporación es el cociente de dividir la lámina captada entre la lámina suministrada, entonces queda:  $8.9 / 10.0 = 0.89$ . Si se riegan 8 horas y la pérdida por arrastre y evaporación fuera constante de 1.1 mm/h (en el peor de los casos), en todo el riego serían de 8.8 mm de pérdidas.

Eficiencia estadística = 0.918. Eficiencia de distribución hidráulica = 0.950. Eficiencia de arrastre y evaporación = 0.89

Haciendo los cálculos se obtiene el cuadro 5.60.

**Cuadro 5.60.** Cuadro resumen de cálculos realizados en la evaluación del sistema de riego con simulación de mejor traslape de lluvia.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	$RR$		6	
Eficiencia estadística	$1-CV$	0.918		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		6.54	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			0.54
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	$Eeya$	0.89		

Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$	7.34	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$		0.81
Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	$Eudh$	0.95	
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eaudh$	7.73	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$		0.39
Suma pérdidas (SP)			1.73
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.78	



**Ilustración 5.72.** Sistema de aspersión portátil manual evaluado.

#### 5.7.3.7.6. Recomendaciones de mejora de acuerdo con la evaluación del sistema de riego

De la prueba de la lluvia generada por el sistema de riego se obtuvieron los resultados siguientes: el coeficiente de variación fue 0.284 por lo que se consideró que la uniformidad de lluvia es baja y esto se refleja en la eficiencia estadística de la aspersión, que fue 0.716 por abajo del límite del indicador recomendado, siendo 0.8 el mínimo aceptable.

La solución es reducir el espaciamiento entre las tuberías regantes a 9 m. para evitar la franja regada con déficit. Otra solución sería cambiar la boquilla de los aspersores de manera que el diámetro de cobertura fuera 24 m. (con el mismo gasto de las tuberías regantes). Esto también mejoraría el traslape entre las regantes.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica. El sistema funciona muy bien incluyendo la pendiente del terreno.

La eficiencia de aplicación se compone de la eficiencia estadística y de eficiencia por arrastre y evaporación, de manera que en el caso de la prueba de riego queda como se indica a continuación:

$$\text{Eficiencia de aplicación} = 0.782 \times 0.853 = 0.667$$

En el caso de la simulación con traslape queda como se indica a continuación:

$$\text{Eficiencia de aplicación} = 0.918 \times 0.89 = 0.817$$

Se espera que la eficiencia de aplicación mejore un 15 % al mejorar el traslape y que el productor no necesite humedecer más la parte mal regada.

Eficiencia global del sistema de riego.

Al aplicar las mejoras se espera que la eficiencia global del sistema de riego por aspersión se incremente de 0.63 a 0.78, por lo que implica ahorros de agua, energía y por lo tanto en costos. Esto implica que si la productividad se mantiene o se aumenta, la productividad del suelo y del agua también aumentará.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

Las pérdidas parciales y globales se presentan en el cuadro siguiente:

**Cuadro 5.61.** Pérdidas de agua expresadas en lámina y con las condiciones actual y mejorado el sistema de riego.

CONCEPTO	ACTUAL (cm)	CON MEJORA (cm)	AHORRO (cm)
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	1.67	0.54	1.13
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	1.32	0.81	0.51
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	0.47	0.39	0.08
Suma pérdidas (SP)	3.46	1.73	1.73
Reducción de pérdidas	1.73 cm o 50 %.		

Como se observa en el cuadro anterior, los ahorros máximos son en la uniformidad de lluvia por un traslape adecuado.

#### 5.7.4. Ejemplo de cálculo de lámina de riego con datos de una evaluación en sistema de riego portátil manual

Se requiere calcular la lámina de riego por aplicar con un sistema de riego por aspersión portátil manual, con base en los resultados de una evaluación del mismo sistema de riego. También, se necesita jerarquizar las pérdidas de agua por las diferentes causas.

#### 5.7.4.1. Información recabada.

El sistema de riego por aspersión aprovecha un pozo de bajo gasto que bombea día y noche a un estanque, caso frecuente en la región lagunera de Coahuila y Durango. Tiene un rebombeo para operar el riego por aspersión, con conducción de tuberías de aluminio con pequeñas fugas.

#### 5.7.4.2. Resultados de la evaluación.

Se realizó la evaluación del sistema de riego y se presentan a continuación los resultados de la evaluación:

Eficiencia estadística – 0.820.

Eficiencia por evaporación y arrastre – 0.93.

Eficiencia de distribución hidráulica – 0.953.

Eficiencia de conducción – 0.98.

Eficiencia de almacenamiento – 0.97.

Se estimó que el requerimiento de riego fue de 6.15 cm, para intervalos de diez días.

#### 5.7.4.3. Cálculos y jerarquización de problemas.

Se preparó una hoja de cálculo con la secuencia de operaciones, fórmulas y datos necesarios para resolver el problema, y se obtuvo el cuadro 5.62.

De la hoja de cálculo se obtuvo que la lámina de riego por aplicar es de 8.90 centímetros.

Al comparar las pérdidas de agua, se concluyó que las correspondientes a la falta de uniformidad de lluvia son las más importantes porque son las mayores; en segundo lugar fueron las correspondientes a arrastre y evaporación; en tercer lugar se encontraron las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica; en cuarto lugar las pérdidas por almacenamiento y, en último lugar, las pérdidas por conducción.

**Cuadro 5.62.** Aplicación de resultados de una evaluación para proyectar un riego eficiente con un sistema de riego por aspersión.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	$RR$		6.15	
Eficiencia estadística	$1-CV$	0.820		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		7.50	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			1.35
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	$Eeya$	0.930		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		8.06	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			0.56
Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	$Eudh$	0.953		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eudh$		8.46	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.40
Eficiencia de conducción (EC)	$EC$	0.980		
Lámina de riego nivel conducción (LRAC)	$LRAC=LRAudh/EC$		8.63	
Pérdidas de conducción (Pcond)	$Pcond=LRAC-LRAudh$			0.17
Eficiencia de almacenamiento (Ealm)	$Ealm$	0.970		
Lámina bruta (LB)	$LB=LRAC/Ealm$		8.90	
Pérdidas en almacenamiento (Palm)	$Palm=LB-LRAC$			0.27
Suma pérdidas (SP)				2.75
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.69		

#### 5.7.4.4. Recomendaciones.

Mejorar la uniformidad de lluvia, cerrando el traslape o cambiando boquillas de los aspersores para que mejore el traslape. Regar cerca del límite inferior de la presión de operación, para que las gotas sean más grandes y se arrastre y se evapore menor cantidad de agua. Posteriormente puede pensarse en incrementar diámetros interiores de las tuberías para reducir las pérdidas de carga hidráulica.

## 6. MÓDULO PARA LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS BAJO AGRICULTURA URBANA

El cultivo en huertos caseros es cada día menos común en México, debido a diferentes factores, entre los que destacan: el cambio en las costumbres y de la cultura de la población, ya que se considera que esta actividad no representa un aporte importante al abasto familiar, actualmente es muy frecuente que de una familia, tanto el padre como la madre trabajen, por lo que no hay quien realice esta actividad y la inculque a los hijos, a su vez, las dimensiones cada vez más pequeñas de las viviendas, provocan que el área disponible (suelo natural) para siembras caseras, sea cada vez más escasa y en muchos casos inexistente.

En las ciudades grandes, las viviendas que cuenta con área disponible y tienen alguna siembra, por lo general se limita a árboles frutales, siendo poco común los cultivos de escarda como hortalizas, hierbas de olor o algún otro cultivo que no sea perenne. En las ciudades pequeñas donde el costo del terreno no ha llegado a ser determinante para haya una fuerte disminución en el tamaño de los solares de las casas, también se ha reducido drásticamente la agricultura de traspatio.

A pesar de lo anterior, existe gran cantidad de información bibliográfica y sitios de internet que promueven estas prácticas llamándolas de diferente manera: agricultura de traspatio, huertos familiares, agricultura urbana y otras; en los cuales se presentan prácticas muy diversas, algunas tradicionales y otras novedosas como la hidroponía, el composteo, la lombricultura, agricultura orgánica, etc.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con la finalidad de buscar alternativas para la práctica de la Agricultura Urbana en ciudades medias y grandes, ha desarrollado “**modelos físicos**” de Agricultura Urbana, tomando en cuenta lo siguiente: viviendas que no se cuenta con un área de suelo natural por lo tanto la siembra se realizará en macetas, cajas de plástico de diferentes medidas así como guacales de madera o plástico habilitados como contenedores con una bolsa de hule; esta actividad se podrá realizar en cualquier área disponible, por ejemplo pasillos, balcones, terrazas o azoteas sin importar que tan reducidas sean, pero será indispensable en esas áreas la luz directa del sol o a través de lámina traslucida. No se requiere agua adicional para el riego, para lo cual se aplicará el agua de reuso de la regadera y del enjuague de la lavadora para lo cual se considera el supuesto de una familia tipo (cuatro personas); además, se deben considerar macetas y sustratos ligeros para no incrementar demasiado el peso en la vivienda.

## 6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 6.1.1. Agricultura urbana en el mundo

Como ya ha sido mencionado antes, la AU es practicada ampliamente en diversas localidades del mundo. Sin embargo, los casos más conocidos y premiados a nivel mundial por su aporte a la seguridad alimentaria son los de Cuba y Argentina. Adicionalmente, países como Perú, Ecuador, Venezuela y Brasil cuentan con programas de agricultura urbana en sus municipalidades, Ciudades grandes y medianas (Soriano, 2002).

Respecto al caso cubano, es sin duda el más exitoso ya que actualmente la Habana y otras ciudades como Cienfuegos tienen una variedad de producción que se concentra en tres formas. Las unidades organopónicas, los patios familiares y los huertos institucionales. Los organopónicos son terrenos baldíos grandes que han sido habilitados para la producción, se les ha puesto infraestructura de riego y camas para materia orgánica (composta). Ahí se producen todo tipo de hortalizas destinadas para el consumo local y del turismo. Han sido desarrollados también sistemas para control de plagas pensando en el entorno urbano de la producción y sus condiciones agro ecológicas particulares de una ciudad. Respecto a los huertos familiares se producen desde hortalizas, plantas medicinales y condimenticias. Parte de esta cosecha se vende o intercambia y otra parte se consume. Los huertos institucionales tienen condiciones similares a los familiares pero tiene mayor disponibilidad de espacio por encontrarse en escuelas o centros educativos. Precisamente ahí es donde está su finalidad. Educar y transmitir la tecnología para que la gente cultive en sus propios patios y logre cierto grado de autosuficiencia en las precarias condiciones de la economía cubana. En la actualidad muchas familias también engordan uno o dos cerdos en sus traspatios, a través de desperdicios, como una forma alternativa de producción e intercambio. También se da la producción de aves y en menor medida la producción láctea (Soriano, 2002).

En el caso de Argentina, la crisis que estallo en diciembre de 2001 trajo un empobrecimiento repentino de grandes sectores de la población. Quienes probablemente resintieron más las crisis fueron los habitantes de los barrios pobres de las grandes ciudades como Buenos Aires. Ante este panorama la organización popular con apoyo del gobierno pero sobre todo de organismos internacionales y de ONG, establecieron como estrategia emergente el establecimiento de comedores populares que un principio daban solamente de comer. Posteriormente este programa se integro al de agricultura urbana y se concreto en la producción de hortalizas, plantas condimentarias y medicinales y en muchos casos huevo y carne de pollo (Soriano, 2002).

Estrategias similares han sido instauradas en países de América, Asia y África. Esto nos demuestra que donde hay crisis o economía de guerra, la agricultura urbana es una

opción real que puede ayudar a paliar estos graves problemas de la seguridad alimentaria. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, no es necesaria una crisis para cobrar conciencia de que con un poco de producción urbana podemos contribuir a tener una mejor alimentación para nuestra familia, encontrar una actividad relajante y que nos acerque a la naturaleza, sobre todo a los ciudadanos y además generar un impacto ambiental positivo (Soriano,2002).

### 6.1.2. Recipientes y contenedores

FAO (2003) indica que los tipos de recipientes y contenedores que se pueden usar o construir deben estar de acuerdo con el espacio disponible, las posibilidades técnicas y económicas y las necesidades y aspiraciones de progreso y desarrollo del grupo familiar.

Las bolsas o mangas plásticas de color negro, como las que se usan para plantas de vivero, son recipientes económicos, fáciles de usar y muy productivos en pequeños espacios (Ilustración 6.1.). Las bolsas son aptas para especies como tomate, pepino, pimiento, pimentón y cebolla (FAO, 2003).



**Ilustración 6.1.** Siembra de plántulas en mangas plásticas.

En la expansión de la huerta pueden incluirse contenedores de madera de por lo menos 1,5 metros cuadrados de área, mangas verticales y otro tipo de estructuras más productivas y que demandan el mismo tiempo y esfuerzo que una gran cantidad de los pequeños recipientes que nos han servido para adquirir las primeras experiencias (FAO, 2003).

### 6.1.3. Sustratos

Entendemos por sustrato un medio sólido inerte, que tiene una doble función: la primera, anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles la respiración y la segunda, contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan (Ilustración 6.2.). El empleo de sustratos sólidos por los cuales circula la solución nutritiva, es la base del Cultivo Hidropónico en América Latina. Los materiales que se han experimentado para uso de laboratorio y para cultivos comerciales son muchos y no siempre han respondido positivamente desde el doble punto de vista técnico y económico (Calderón y Cevallos, 2003).



Ilustración 6.2. Bulto de sustrato hidropónico.

### 6.1.4. Drenaje

Todo tipo de recipiente y de sustrato que se esté utilizando, deberá permitir un buen drenaje (Ilustración 6.3.). Cuando una planta hidropónica requiere mayor cantidad de agua, debemos aplicar mayor cantidad de riegos, pero nunca debemos inundar el sustrato con el fin de ahorrar riegos, ya que esto va contra la disponibilidad de oxígeno (Calderón y Cevallos, 2003).



**Ilustración 6.3.** Prueba de drenaje de los sustratos.

Entre las formas más comunes de drenaje utilizadas en los Cultivos Hidropónicos, tenemos las siguientes:

**Drenaje por inclinación del recipiente:** Se utiliza en el caso de las canaletas, bandejas, camillas, camas, etc., las cuales deberán tener una pendiente de entre el 1 y el 5 % con el fin de facilitar el drenaje de los excesos de solución nutritiva (Ilustración 6.4.). Con el avance y perfeccionamiento de la técnica hidropónica, la pendiente de las camas se ha llegado a reducir hasta el 0.5 %, aunque en general para un adecuado drenaje longitudinal se aconseja no bajar del 1 % (Calderón y Cevallos, 2003).



**Ilustración 6.4.** Drenaje por inclinación en macetas.

Drenaje por orificios inferiores: En el caso de bancadas o recipientes individuales tales como potes, bolsas o sacos, el drenaje deberá facilitarse siempre por orificios en la parte inferior del recipiente. Igualmente este es el método adecuado cuando se utilizan camas colgantes (Calderón y Cevallos, 2003).

### 6.1.5. Calidad del agua de riego

El agua de riego debería pasar por un análisis de adecuación agrícola durante la selección del lugar para el invernadero (Ilustración 6.5.). Todas las fuentes de agua naturales contienen algunas impurezas: algunas son benéficas para el crecimiento de las plantas y otras son perjudiciales (Jensen, 1997).

**LABORATORIOS QUIMICOS, S. A.  
LAQUISA**  
Cel. 854-2550 - 854-2644

**INFORME DE ANALISIS**

Cliente: V/A PUES TOURS, S.A.  
Nombre de la muestra: La Fincana Costigüina  
Descripción de la Muestra: Agua  
Fecha de Ingreso: Abril 14, 2009  
Referencia del Laboratorio: AG-0187-09

Lugar de Muestreo: Chinandega/Chinandega  
Munic / Depto: Chinandega/Chinandega  
Fecha de Muestreo: Abril 23, 2009  
Muestreado por: Cliente

ANALISIS	UNIDAD MEDIDA	RESULTADO
Sodio	mg/l	216.4
Potasio	mg/l	22.0
Calcio	mg/l	152.6
Magnesio	mg/l	92.0
Carbonatos	mg/l	0.0
Bicarbonatos	mg/l	216.3
Sulfatos	mg/l	366.0
Cloruros	mg/l	276.1
pH	-	6.9
Conductividad Eléctrica	µS/cm	>1,946.0
Nitritos	mg/l	<0.03
Nitratos	mg/l	28.0
Fosfatos	mg/l	0.40
Dureza Como CaCO <sub>3</sub>	mg/l	759.7
Flor	mg/l	0.32
Arénico	µg/l	3.7

LAQUISA, es responsable sólo de la exactitud de los resultados de la muestra recibida.  
Para la reproducción de este informe deberá haber un escrito autorizando por LAQUISA.

Lk. Indiliani Lucía Agosta López  
Analista

Carretera León - Managua Km. 83  
Apartado 154 E-MAIL: laquisa@gmail.com  
León, Nicaragua

**Ilustración 6.5.** Muestra de un análisis químico de agua.

La calidad del agua ha llegado a ser un asunto importante para los productores en invernaderos, especialmente donde son aplicados grandes cantidades de agua para un medio de crecimiento de volumen restringido. El crecimiento de la planta es afectado por la interacción de los elementos químicos disueltos en el agua, las propiedades químicas del medio de crecimiento en el cual el agua es aplicada y al programa de fertilidad empleado (Jensen, 1997).

### 6.1.6. Plantación

En los sistemas de cultivo sin suelo que mantienen el sustrato embolsado, deberemos cortar o agujerear el plástico para enterrar el cepellón de las plantas que han desarrollado su fase de semillero en bandejas de alvéolos, o simplemente apoyar en el sustrato y sujetar clavando la piqueta adherida al microtubo del gotero al saco de sustrato, para aquellas plantas cuyo semillero se ha realizado en bloques de lana de roca. En este punto tiene especial importancia el contacto del material del semillero con el sustrato definitivo, para asegurar el enraizamiento de la planta.

Existe la posibilidad de realizar siembra directa, aunque en la práctica apenas es utilizada, por las ventajas del manejo de plantaciones con planta procedente de semilleros.

### 6.1.7. Nutrición de las plantas

Los nutrientes para las plantas cultivadas en HHP son suministrados en forma de soluciones nutritivas que se consiguen en el comercio agrícola. Las soluciones pueden ser preparadas por los mismos cultivadores cuando ya han adquirido experiencia en el manejo de los cultivos o tienen áreas lo suficientemente grandes como para que se justifique hacer una inversión en materias primas para su preparación (FAO, 2003).

Alternativamente, si las mismas estuvieran disponibles en el comercio, es preferible comprar las soluciones concentradas, ya que en este caso sólo es necesario disolverlas en un poco de agua para aplicarlas al cultivo (Ilustración 6.6.). Las soluciones nutritivas concentradas contienen todos los elementos que las plantas necesitan para su correcto desarrollo y adecuada producción de raíces, bulbos, tallos, hojas, flores, frutos o semillas (FAO, 2003).



**Ilustración 6.6.** Inyectores de la solución nutritiva.

#### 6.1.7.1. Solución nutritiva

Así como los humanos requerimos alimentarnos para poder vivir, las plantas también, ellas necesitan de una solución nutritiva que se define como un conjunto de elementos nutritivos requeridos por las plantas, esa solución nutritiva consta de sales minerales que son disueltos en el agua (hydroenvironment).

En los cultivos hidropónicos (Ilustración 6.7.), las plantas crecen en el agua o en diferentes tipos de sustratos inertes que no aportan ningún tipo de alimento. Los nutrientes son proporcionados mediante una solución nutritiva es la cual se disuelve en agua, esta solución nutritiva en hidroponía las hará crecer sanas, vigorosas y con excelentes cosechas (hydroenvironment).



**Ilustración 6.7.** Cultivo hidropónico.

#### 6.1.8. Plagas y enfermedades en cultivos hidropónicos

Las plagas y enfermedades constituyen uno de los elementos limitantes dentro de la producción de cualquier cultivo. De aquí que su control, sea un factor a tener presente desde la siembra o trasplante hasta la cosecha. Sin embargo muchas veces al no tener un adecuado conocimiento de los posibles microorganismos y patologías asociadas a las distintas especies, y el no saber distinguir claramente la sintomatología que producen distintos hongos, bacterias o virus en las plantas, nos lleva a aplicar medidas de control inapropiadas (FAO, 2004).

### 6.1.8.1. Hongos

Como ya se ha señalado este grupo de microorganismos constituye el más importante desde el punto de vista económico en cuanto a su frecuencia de aparición y daño que pueden causar (FAO, 2004).

### 6.1.8.2. Bacterias

Probablemente este grupo de patógenos constituye el segundo en importancia, luego de los hongos, si tenemos en cuenta el número y gravedad de las enfermedades que produce. Pueden ser consideradas como los organismos más pequeños capaces de desarrollarse independientemente, a diferencia de los virus (FAO, 2004).

### 6.1.8.3. Virus

Los virus son patógenos intracelulares causantes de numerosas pérdidas en plantas cultivadas, siendo uno de los principales factores limitantes de la producción. Al no existir medidas de control curativo para este tipo de enfermedades, la lucha contra estos agentes patógenos se ha basado en medidas preventivas como prácticas culturales, que incluyen control de agentes vectores, eliminación de fuentes de infección, utilización de material de propagación libre de virus y modificación en las fechas de siembra o plantación entre otras (FAO, 2004).

## 6.2. MATERIALES Y MÉTODOS FÍSICOS

A continuación se presenta una propuesta de materiales a emplear en un módulo de agricultura urbana, así como el método de empleo o labores a realizar.

### 6.2.1. Materiales

Con la finalidad de aprovechar algunos espacios disponibles en los hogares, como son: departamentos, patios, terrazas, balcones o azoteas. Se diseñaron y construyeron dos “**modelos físicos**” de agricultura urbana vertical, en los cuales se puede tener cultivos en varios niveles sobre una misma área de producción, y con ello hacer eficiente el poco espacio disponible de las áreas antes mencionadas.

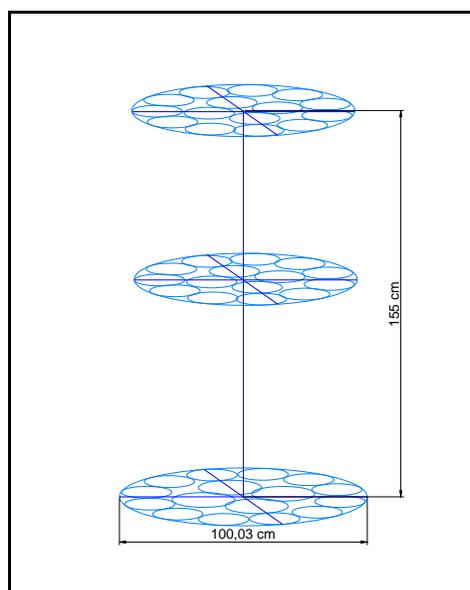
#### 6.2.1.1. Árbol de producción

Éste es un modelo físico que consta de una estructura metálica (figura 8), con la característica principal de que consta de tres niveles de producción, con espacios para macetas de 7, 8 y 10 pulgadas de diámetro, el modelo tiene una altura de 1.55 m, y

alcanza una altura de hasta 1.9 m con plantas, es de estructura metálica con un peso 32 kg, con macetas y plantas alcanza un peso de 167.4 kg, la base de la parte inferior tiene un diámetro de 1.03 m, ocupa un área de 0.83 m<sup>2</sup> con un total 46 plantas (macetas), las cuales están distribuidas de la siguiente manera: en el nivel inferior caben 17 macetas, en el nivel medio caben 15 macetas, y en el nivel superior caben 14 macetas, se tiene una densidad de 55.4 plantas por metro cuadrado (cuadro 6.1.).

**Cuadro 6.1.** Características físicas del árbol de producción.

	Peso (kg)	Diámetro de Base inferior (m)	Alto (m)	Diámetro de Macetas utilizadas	Área ocupada (m <sup>2</sup> )	Número total de macetas	Plantas/m <sup>2</sup>	Costo (\$)
Estructura metálica	32	1.03	1.55	7, 8 y 10"	0.83	46	55.4	3,250.0
Con macetas	167.4		1.90					



**Ilustración 6.8.** Esquema del "Árbol de producción".

Este dispositivo permite la producción de varios cultivos al mismo tiempo, con la ventaja de que se puede usar en espacios reducidos (departamentos, casas, azoteas, balcones, etc.). Estos cultivos deben ser de porte bajo para que su desarrollo no sea limitado por los niveles superior, algunos de los cultivos de porte bajo pueden ser: lechugas, romeritos, albahaca, hierbabuena, menta, orégano, té limón, verdolaga, apio, chile, tomillo, acelgas, espinacas, etc. No es recomendable para hortalizas de raíz (rábano, betabel, zanahoria, etc.) ya que la profundidad del sustrato en las macetas es muy poca para el desarrollo de la raíz (Ilustración 6.9.).



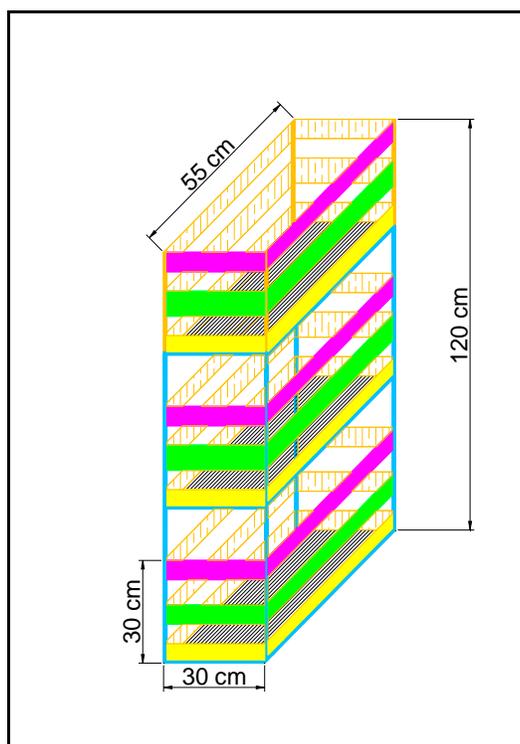
**Ilustración 6.9.** Dispositivo “Árbol de producción”.

#### 6.2.1.2. Cajoneras verticales

Este modelo físico de producción urbana. Tiene una base metálica en forma rectangular, con tres niveles de producción, en cada nivel hay cejas al interior para colocar los contenedores, la separación entre niveles es de 45 cm, en estas estructuras se colocan las cajas de madera (guacales) en secuencia vertical, los contenedores se colocan hasta una altura de 0.90 m, con el contenedor alcanza una altura de 1.20 m y de 1.5 m de alto con plantas, la estructura tiene un peso de 8.9 kg, y con los contenedores y plantas llega a 120 kg, tiene un ancho de 0.3 m, y un largo de 0.55 m, ocupa un área de producción de  $0.165 \text{ m}^2$ , con lo que se tiene una densidad de 54.5 plantas por  $\text{m}^2$  (cuadro 6.2. y Ilustración 6.10.).

**Cuadro 6.2.** Características físicas de la cajonera.

	Peso (kg)	Alto (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Área total (m <sup>2</sup> )	Huacales	Plantas m <sup>2</sup>	Costo (\$)
Sin macetas	8.9	0.90	0.30	0.55	0.165	0.495	3	54.5	300.00
Con macetas	120	1.5							



**Ilustración 6.10.** Esquema “Cajonera vertical”.

Los huacales pueden conseguirse en el mercado, en recauderías y/o fruterías, es necesario colocar una bolsa o cubierta de plástico para mantener el sustrato dentro del huacal, a la cubierta plástica se le hacen perforaciones con la finalidad de proporcionarle drenaje (Ilustración 6.11.). En las cajoneras es posible producir cultivos como tomate verde, chile, jitomate, hierbabuena, calabaza, pápalo, hinojo, pepino, fresa y romerito.



**Ilustración 6.11.** Dispositivo “Cajonera vertical”.

### 6.2.2. Metodología

En la metodología se incluyen cada una de las labores que hay que realizar para el establecimiento y manejo de un módulo de agricultura urbana, los cuales se describen a continuación.

#### 6.2.2.1. Sustrato

Para seleccionar el sustrato (suelo), se deben tener en cuenta varios aspectos, como la disponibilidad y el costo, ya que hay sustratos que son baratos y fáciles de conseguir solo en algunas zona o ciudad y adquirirlo en otro lugar seria mas costoso, por lo tanto hay que utilizar aquel del que se tenga disponible y a bajo costo. Otras características que se toman en cuenta son la capacidad de retención de humedad y el contenido de materia orgánica, ya que esta última es una reserva de nutrimentos que se van liberando gradualmente.

Materiales apropiados para un buen sustrato son: la tierra de monte que proporciona tanto elementos minerales como materia orgánica, la tierra de hoja que tiene un gran contenido de materia orgánica en proceso de descomposición, la composta de residuos vegetales domésticos tiene muy buena fertilidad, el tezontle o la perlita agregan al sustrato una gran

capacidad de retención de humedad y el peat moss, que es de gran utilidad para el uso en almácigos.

Por el contrario el uso de cascarilla de arroz sin compostear o el aserrín, no son recomendables, ya que estos en su descomposición, compiten con las plantas por el nitrógeno disponible, y en el caso del aserrín, en su descomposición interviene una bacteria que produce toxicidad a las plantas.

En el Módulo de agricultura urbana que se implementó en IMTA, se preparó como sustrato, una mezcla con un contenido de 50 % de tierra de hoja, y 50 % de tierra de monte, con esta mezcla (Ilustración 6.12.) se obtuvo una buena retención de humedad para las plantas y a la vez un adecuada aireación, evitando que se desarrollen hongos y bacterias en las raíces. Además que ambos sustratos se encuentran en casi cualquier vivero de Cuernavaca.



**Ilustración 6.12.** Mezcla preparada para sustrato.

Se requiere calcular el volumen de sustrato total a ocupar, de acuerdo al número y tamaño de macetas o contenedores por instalar y a la altura del sustrato por aplicar en cada maceta o contenedor, ya que, como en el caso del rábano u otras hortalizas de raíz, se necesita una capa suficiente de sustrato para que se desarrolle la raíz, o en el caso

contrario, las verdolagas necesitan una capa de sustrato de menor tamaño, con esa información comprar solamente la cantidad de sustratos que se utilizarán para la mezcla.

#### 6.2.2.2. Contenedores

La maceta tradicionales de barro o cerámica es el contenedor más común en el mercado, sin embargo por su costo y fragilidad no son adecuadas para un huerto urbano, es necesario buscar macetas que no sean costosas, pesadas y frágiles, que sean de la capacidad que se requiere para el tamaño y tipo de planta que vamos a cultivar, así como de la cantidad o volumen que requerimos para consumo de un cultivo determinado, con esto se podrá definir el tamaño y número de macetas o contenedores. (Ilustración 6.13.).



**Ilustración 6.13.** Modelos de macetas propuestas para un módulo de agricultura urbana.

En el módulo de agricultura urbana del IMTA, se utilizaron macetas de plástico de distintas capacidades así como guacales de madera (Ilustración 6.14.), los cuales se pueden obtener en mercados locales, tianguis, supermercados o lugares de reciclaje. Como alternativa, se pueden utilizar también: botes, llantas, cajas de plástico, tinas de plástico, bolsas de polietileno y tubos de P.V.C.



**Ilustración 6.14.** Contenedores usados para la producción.

En el cuadro 6.3. se presentan las características físicas de las macetas y guacales utilizados en el proceso de producción de los modelos físicos de agricultura urbana.

**Cuadro 6.3.** Características de los contenedores usadas en la producción.

Contenedor	Dimensiones (cm)	Espesor de suelo (cm)	Área útil (m <sup>2</sup> )	Volumen de suelo (lt)	Peso total (kg)
Maceta de 7 pulgadas	18 x 15	13	0.025	1.650	1.79
Maceta de 8 pulgadas	20 x 16	14	0.031	2.700	2.95
Maceta de 10 pulgadas	25 x 22	20	0.049	6.325	6.94
Guacal de madera	49 x 30 x 29	23	0.147	33.810	36.53

### 6.2.2.3. Drenaje

Las macetas y contenedores deberán contar con dos o tres orificios en la parte inferior para drenar el exceso de agua de riego o de lluvia. En la (Ilustración 6.15.), se presenta un ejemplo de maceta de plástico comercial, que presenta ocho orificios los cuales son demasiados para el tamaño de maceta, ya que el exceso de drenaje, reducen la capacidad de retención de humedad en el sustrato, en este caso si lo orificios solo vienen marcados, solo se deberán de abrir dos o tres, y si ya vienen abiertos, tapar con cartón los restantes antes de llenarla del sustrato. El exceso de drenaje representa una pérdida de nutrimentos, por lo tanto se deben aplicar riegos ligeros y frecuentes, de preferencia cada dos o tres días, para evitar en lo posible que las macetas drenen cuando se aplica el riego. La falta de orificios de drenaje puede provocar pudrición de raíces en tiempo de lluvia.



**Ilustración 6.15.** Orificios de drenaje.

En caso de utilizar un contenedor que tenga orificios muy grandes (cajas de plástico o huacales de madera), se debe de colocar una bolsa de plástico en el interior del contenedor y hacer pequeños orificios en la parte inferior de la bolsa. Esto con el fin de evitar que el sustrato se salga y tener un drenaje adecuado.

#### 6.2.2.4. Siembra

Los métodos de siembra que se pueden realizar en un huerto urbano son, siembra directa, siembra en almácigo y trasplante. Los cultivos con los que se trabajó en el Módulo de Agricultura Urbana,

Siembra directa: Para facilitar los trabajos y ahorrar tiempos, de los cultivos que se tuvieron en el Módulo de Agricultura Urbana, solos 4 fueron de siembra directa. Las semillas se adquirieron en casas de agroquímicos, en sobres de unos cuantos gramos según el tamaño de la semilla (Ilustración 6.16.), y de acuerdo a lo que se requirió para cada cultivo, pero también se pueden adquirir por paquete cerrado de una libra, de este modo se podrán adquirir variedades con mejores características de producción y puede ser más económico, siempre y cuando se agrupen con otros productores urbanos.



**Ilustración 6.16.** Semillas utilizadas en la siembra directa.

Las semillas deben ser sembradas a una profundidad de 0.5 a 2.5 cm (Ilustración 6.17.), según el tamaño de la misma y posteriormente cubiertas por una ligera capa de sustrato, con el fin de evitar que las semillas pierdan humedad durante la emergencia o debido al exceso de radiación solar. En el cuadro 6.4., se presenta la profundidad de siembra y los días a germinación de varios cultivos de interés para un huerto urbano



**Ilustración 6.17.** Siembra directa de las semillas.

**Cuadro 6.4.** Profundidad de siembra y germinación de semillas utilizadas.

No.	Especie	Días a germinación	Profundidad de siembra (cm)
1	Sandía	7	2.5
2	Calabacita	6	2.0
3	Melón	6	2.0
4	Pepino	5	1.0
5	Rábano	4	0.5
6	Cilantro	13	0.5
7	Pápalo	18	1.5
8	Lechuga	4	0.5
9	Acelga	4	0.5
10	Espinacas	4	0.5
11	Tomate	5	2.0
12	Jitomate	6	1.0

Los cultivos que se sembraron directamente fueron: acelga, cilantro, rábano, betabel, y calabaza.

Siembra en almácigo o semillero: Este método de siembra es de gran utilidad para asegurar la nacencia del número planeado de plantas por unidad de superficie, además que se tienen un mejor control para tener plantas más sanas y vigorosas.

Para realizar la siembra en el almácigo se requiere un sustrato especial a base de peat moss, mezclado con arena, tezontle o perlita para proporcionarle un buen drenaje, además de requieren charolas un área sombreada y riegos aplicados con cebolleta. Además se requiere planear hacer la planeación de las fecha de esta siembra en el almácigo y posteriormente el trasplante.

#### 6.2.2.5. Trasplante

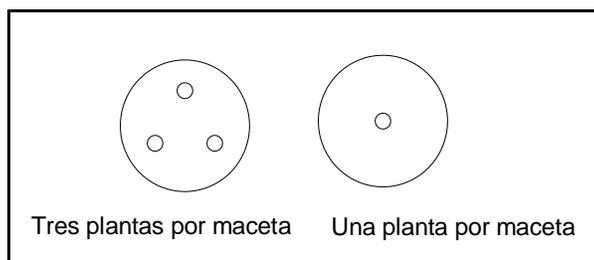
Para el Módulo de Agricultura Urbana se adquirieron plántulas de pepino, chile, lechuga, jitomate y tomate verde, de un de un vivero que produce plántulas de hortalizas, del cual se tiene muy buena referencia, por producir plantas de buena calidad, ya que se dedica en forma comercial a producir planta para productores de hortalizas. Las plántulas generalmente se manejan como cepellón y contenidas en charolas. Previo al trasplante se prepara el sustrato, el cual debe ser humedecido para evitar choques de estrés a las plántula, en seguida con una estaca se marca en el sustrato y se planta, posteriormente tener los cuidados necesarios para que las planta se adaptarse rápidamente al lugar definitivo en las macetas o contenedores, en las cuales se colocan, dos o más de acuerdo al tamaño (Ilustración 6.18).



**Ilustración 6.18.** Trasplante de plántulas.

También para el trasplante se adquirieron pequeñas plantas como apio, hierbabuena, té limón, árnica, ruda, menta, orégano, albahaca, hinojo y tomillo, estas se adquirieron en algunos pequeños invernaderos, donde se localizaron estas especies, estas plantas por lo general vienen en pequeñas macetas y se trasplantan a macetas de mayores dimensiones o contenedores de acuerdo a la producción esperada de cada una de estas, para estas se tienen los mismos cuidados previos al trasplante que se tuvieron con las plántulas

Al hacer el trasplante, las plantas o plántulas deben quedar al centro de las macetas o contenedores en el caso de que fuera una sola planta, pero si son dos o más por maceta, se deben distribuir uniformemente en los contenedores, como se muestra en la Ilustración 6.19., con la finalidad de que al crecer las plantas tengan una distribución uniforme en el espacio disponible.



**Ilustración 6.19.** Distribución de las plantas en los contenedores.

Es necesario realizar huecos del tamaño del cepellón de la planta en el sustrato, con el fin de no lastimar las raíces y colocar las plantas en un lugar correcto. Los cultivos como verdolaga o epazote que se desarrollan en forma silvestre, estas se colectan y se trasplantan en forma similar a las otras. Los cultivos de porte alto como, jitomate, pepino tomatillo y té limón, etc., se sembraron en guacales de madera, tomado en cuenta su tamaño y el tipo de crecimiento, ejemplo Ilustración 6.20.



**Ilustración 6.20.** Cultivo de porte alto.

Los cultivos de porte bajo (Ilustración 6.21.) como lechuga, acelgas, rábanos, albahaca, verdolaga y apio, se sembraron en cajas de plástico y en macetas.



**Ilustración 6.21.** Cultivo de porte bajo.

#### 6.2.2.6. Riego

El riego se aplicó del agua potable, que es suministrada en el Instituto por un pozo, la cual tiene un pH de 7.3 y una C.E. de 0.4 mmhos, con lo que es apta para el riego. El riego se aplicó manualmente con una cubeta o una jícara de plástico y con un tanque elevado (Ilustración 6.22.). En promedio se aplicó una lámina de riego de 1.6 cm, cada tercer día, manteniendo la humedad del sustrato muy cerca de capacidad de campo, para evitar el estrés hídrico.



**Ilustración 6.22.** Aplicación del riego a los cultivos.

#### 6.2.2.7. Fertilización

Fertilización: se realizó junto con el riego, aplicando la solución nutritiva de un paquete tecnológico para hidroponía desarrollado en la UACH (Sánchez, *et al.* 2006).

Se hicieron “Soluciones Madre” de cada fertilizante, utilizando recipientes de 2.5 litro para macro-nutrientes y de 1 litro para micro-nutrientes, se disolvió la cantidad proporcional de cada fertilizante para preparar una solución de 500 litros.

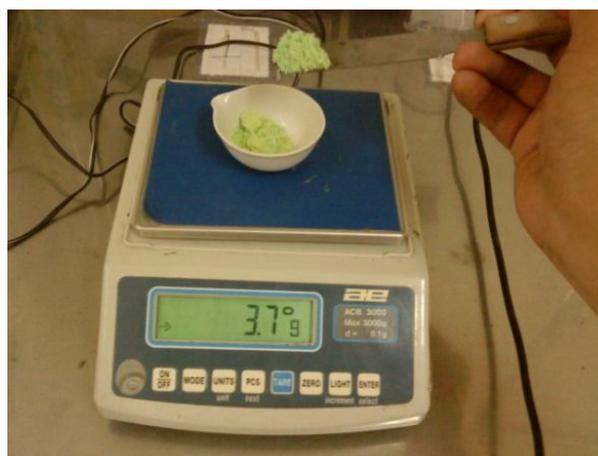
Fertilizantes usados en la producción

En el módulo de agricultura urbana, la fertilización se aplicó junto con el riego, aplicando un paquete tecnológico para hidroponía desarrollado en la UACH (Sánchez, *et al.* 2006). En el cuadro 5 se presenta la descripción de la solución nutritiva usada para preparar una solución de 1,000 litros. Con objeto de evitar quemaduras, en los diversos cultivos (herbáceas, hortalizas de fruto y hortalizas de raíz) la solución se preparó al 75%. Estos fertilizantes solubles se pueden adquirir en casas de venta de agroquímicos o en comercios de jardinería y en autoservicios.

**Cuadro 6.5.** Fertilizantes usados para una solución de 1,000 litros.

Producto	Peso al 100% (g)	Peso al 75% (g)	Solubilidad en agua (kg/l)
Nitrato de calcio	970.00	727.50	1:1
Ácido fosfórico	131.00	98.25	1:1
Sulfato de potasio	166.70	125.02	1:15
Sulfato de magnesio	600.00	450.00	1:3
Sulfato ferroso	15.00	11.25	1:5
Sulfato de manganeso	4.00	3.00	1:3
Bórax	4.50	3.37	1:27
Sulfato de zinc	0.44	0.33	1:3
Sulfato de cobre	0.40	0.30	1:5

Para facilitar la preparación de la solución nutritiva, se preparan “Soluciones Madre” de cada fertilizante, éstas pueden realizarse utilizando recipientes de 2.5 litros para macro-nutrientes y de un litro para micro-nutrientes; en cada recipiente se debe disolver la cantidad proporcional de cada fertilizante para preparar una solución de 500 litros como se muestra en la Ilustración 6.23.



**Ilustración 6.23.** Preparación de la solución madre.

Para preparar la solución fertilizadora que se aplicó cada tercer día, se utilizaron 5 ml/litro de la solución de macro-nutrientes y 2 ml/litro de la de micro-nutrientes. El volumen de fertilizante aplicado cada tercer día fue de 80 litros, por lo tanto se aplicaban 400 ml de los macro-elementos y 160 ml del micro-elemento, como se muestra en la Ilustración 6.24.



**Ilustración 6.24.** Medición de la solución nutritiva.

Para preparar la solución nutritiva, se requiere tomó en cuenta el cuadro 6.6., en el cual se indica la compatibilidad de los fertilizantes a la hora de hacer las aplicaciones de fertilizantes, y evitar depósitos.

**Cuadro 6.6.** Compatibilidad de los fertilizantes.

	Urea	Nitrato de amonio	Sulfato de amonio	Nitrato de calcio	Nitrato de potasio	Cloruro de potasio	Sulfato de potasio	Fosfato de amonio	Sulfato de Fe, Zn, Cu, Mn	Sulfato de magnesio	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico
Urea	√											
Nitrato de amonio	√	√										
Sulfato de amonio	√	√	√									
Nitrato de calcio	√	√	X	√								
Nitrato de potasio	√	√	√	√	√							
Cloruro de potasio	√	√	√	√	√	√						
Sulfato de potasio	√	√	R	X	√	R	√					
Fosfato de amonio	√	√	√	X	√	√	√	√				
Sulfato de Fe, Zn, Cu, Mn	√	√	√	X	√	√	R	X	√			
Sulfato de magnesio	√	√	√	X	√	√	√	X	√	√		
Ácido fosfórico	√	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	
Ácido sulfúrico	√	√	√	X	√	√	R	√	√	√	√	√
√ = Compatible				X = Incompatible				R = Baja afinidad				

Otros productos que se pueden utilizar para complementar la fertilización son: aminoácidos, coadyuvantes no iónicos, correctores de pH y hormonas (citoquininas).

#### 6.2.2.8. Plagas y enfermedades

Al tener diversos cultivos en un espacio reducido, se presentaron diversas plagas y enfermedades que en algunos casos atacaron a todos cultivos como la hormiga arriera (Ilustración 6.25.). Las plagas que se presentaron con mayor incidencia fueron: hormiga arriera, pulgón, araña roja, mosca blanca (Ilustración 6.26.) y gusanos. Las enfermedades más frecuentes fueron: Cenicilla (Ilustración 6.27.) y Alternaria (Ilustración 6.28.), la primera tuvo mayor presencia en casi todos los cultivos.



**Ilustración 6.25.** Hormiga arriera.



**Ilustración 6.26.** Mosquita blanca.



**Ilustración 6.27.** Cenicilla en hoja de chile.



**Ilustración 6.28.** Alternaria en Jitomate.

Para controlar las plagas y enfermedades se pueden usar productos económicos y de baja toxicidad que se pueden adquirir en casas locales de agroquímicos, en la Ilustración 6.29., se presentan los productos que fueron utilizados.



**Ilustración 6.29.** Productos agroquímicos utilizados para el control de plagas y enfermedades.

Para las plagas se puede utilizar: agua jabonosa (mosca blanca), Buprofezin (mosquita blanca), Azufre agrícola (araña roja), Sulfluramida (hormiga), Flonicamid (pulgón) y Permetrina (gusanos). Para las enfermedades se recomienda utilizar Carbendazim para cenicilla y Captan para alternaría.

El cuadro 6.7., muestra los Ingredientes activos de los agroquímicos utilizados para el control de las plagas y enfermedades, con sus respectivas dosis de aplicación.

**Cuadro 6.7.** Productos utilizados para el control de plagas y enfermedades.

No.	Enfermedad/plaga	Producto*	Dosis (gramos/litro de agua)
1	Hormiga arriera ("cuatalata") y gusanos	Permetrina	---
2	Pulgón	Flonicamid	0.5
3	Araña roja	Azufre agrícola	0.7
4	Mosa blanca	Buprofezin	0.5
5	Alternara	Captan	1.0
6	Cenicilla	Carbendazim	0.7

\* Ingrediente activo

Para optimizar el trabajo en áreas pequeñas, se recomienda que las aplicaciones para el control de plagas y enfermedades en casas, patios, azoteas, balcones y terrazas, se hagan con un atomizador agrícola de 2.5 lt, como el de la figura 30 y hacer una calendarización de los productos a aplicar, seleccionando un día de la semana y una determinada hora para hacer las aplicaciones preventivas, esto con el fin de llevar un registro de los productos usados, y tener en reserva los productos por usar, como se muestra en el cuadro 6.8.



**Ilustración 6.30.** Aspensor agrícola.

**Cuadro 6.8.** Calendarización de los productos a usar.

<b>Día de aplicación:</b>	<b>Martes</b>	<b>Calendario</b>											
<b>Hora de aplicación:</b>	<b>18:30</b>	<b>Jun</b>				<b>Jul</b>				<b>Ago</b>			
<b>Producto</b>	<b>Dosis (g/l)</b>	<b>Semanas</b>											
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Permetrina	---	X						X					
Flonicamid	0.5		X						X				
Azufre Agrícola	0.7			X						X			
Buprofezín	0.5				X						X		
Captan	1.0					X						X	
Carbendazim	0.7						X						X

Las aplicaciones deben ser en horarios en que la temperatura sea entre 12 y 30°C., y que haya vientos menores a 5 km/h., esto con el fin de evitar una intoxicación de las personas, y evitar quemaduras en los distintos órganos de los cultivos (Ilustración 6.31.).



**Ilustración 6.31.** Aplicación de plaguicidas en los cultivos.

#### 6.2.2.9. Tutoreo

En cultivos como son: pepino, calabacita, jitomates o tomate verdes es necesario colocar soportes para el crecimiento llamados tutores, estos tutores son apoyos para guiar y ayudar a las plantas en su crecimiento y desarrollo, es necesario colocarlos antes de que las plantas tengan un crecimiento y desarrollado avanzado, de lo contrario las plantas pueden tener problemas sanitarios y una baja producción. Los tutores pueden ser mallas, o simples rafias ubicadas alrededor de la planta, en este módulo de agricultura urbana se usó rafia como se puede ver en la Ilustración 6.32., en la que se muestra el tutoreo de jitomate.



**Ilustración 6.32.** Tutoreo de cultivos.

### 6.2.2.10. Cosecha

La cosecha se inicia cuando los diferentes cultivos están a punto, en la Ilustración 6.33., se aprecia la variedad que se puede tener, los cortes se realizan en base al órgano de interés de cada uno de los cultivos del huerto urbano, para lo cual se dividieron en tres grupos: hojas o tallos, flores, y por último el grupo de los frutos, en las Ilustración 6.34., 6.35. y 6.36. se pueden apreciar, en el cuadro 6.9. presenta un ejemplos de algunos cultivos que integran cada grupo.



**Ilustración 6.33.** Variedad de cultivos.



**Ilustración 6.34.** Cosecha de Apio (grupo de tallos y hojas).



**Ilustración 6.35.** Cosecha de flores de árnica (grupo de flores).



**Ilustración 6.36.** Cosecha de jitomates (grupo de frutos).

**Cuadro 6.9.** Cultivos que pueden integrar cada grupo.

Grupo	Especie
<b>Hojas y tallos</b>	Té limón
	Albahaca
	Cilantro
	Verdolaga
	Romerito
	Hierbabuena
	Epazote
	Apio
<b>Flores</b>	Árnica
<b>Frutos</b>	Jitomate
	Chiles
	Pepinos

Al tener en producción varios cultivos, se debe determinar un punto de cosecha para cada grupo, el tipo de crecimiento del cultivo, el órgano de interés, y si es o no un producto climaterio, esto es que después de cosechado sigue su proceso de maduración, como ejemplo están: jitomate, chile y tomate de cáscara, por lo anterior se determinaron tres puntos de corte, uno por cada grupo de producción.

Grupo de hojas y tallos: la cosecha en este grupo se realiza cuando las plantas presentaban un buen número de hojas y su tamaño es óptimo para el consumo, como se aprecia en la Ilustración 6.37.



**Ilustración 6.37.** Acelgas lista para cosechar.

En la cosecha de este grupo de cultivos se requiere tener el cuidado de dejar yemas axilares en los tallos de la planta a la que se le realice un corte, de esta manera se asegura la continúa producción de esa planta, como se muestra en las Ilustración 6.38. y 6.39., de lo contrario es necesario reponer la planta.



**Ilustración 6.38.** Corte por encima de las yemas axilares.



**Ilustración 6.39.** Brotación de las yemas axilares.

Grupo de flores: la cosecha en este grupo se realiza cuando las flores están totalmente abiertas como se muestra en la flor de árnica de la Ilustración 6.40.



**Ilustración 6.40.** Punto de corte de flores.

Grupo de frutos: los cultivos representativos de este grupo son jitomate, pepino y chile, a los que se les realiza el corte antes de que se encuentren completamente maduros para el consumo, por ejemplo el punto de corte para el jitomate, es decir cuando comenzara a presentarse una pigmentación rojiza, y para el pepino, es cuando presentaba una coloración verde oscura además de que ya no tengan “costillas”, como se muestra en la Ilustración 6.41.



**Ilustración 6.41.** Punto de corte de frutos.

Para llevar un control de lo que se obtuvo en el módulo de agricultura urbana, en cada corte que se realizó de cada cultivo, se tomo el peso y se registro, así como del número de maceta del cual provenían como se muestra en las Ilustración 6.42. y 6.43.



**Ilustración 6.42.** Numeración de macetas.



**Ilustración 6.43.** Peso de los cultivos producidos.

#### 6.2.2.11. Procesamiento

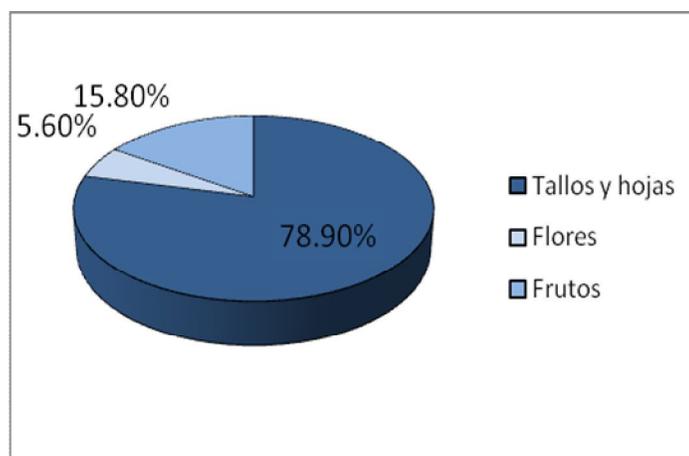
Para el consumo o uso de algunos de los cultivos, se requiere un procesamiento posterior al corte, tal es el caso de: las hojas de orégano, menta o hierbabuena, así como para las flores de árnica, las cuales requieren de secado colocarse en lugares secos, frescos y con poca iluminación para ser, como se muestra en la Ilustración 6.44. Estos productos ya deshidratados adecuadamente, pueden ser consumidos en infusiones refrescantes (té frío de hierbabuena o menta), o como condimento en algunos platillos y en el caso de la flores deshidratadas de árnica puede ser utilizadas como infusiones para el tratamiento de problemas musculares, moretones en el cuerpo, prevenir la formación de coágulos de sangre en el cuerpo, o para agilizar la cicatrización de heridas.



**Ilustración 6.44.** cultivos desecados para su uso.

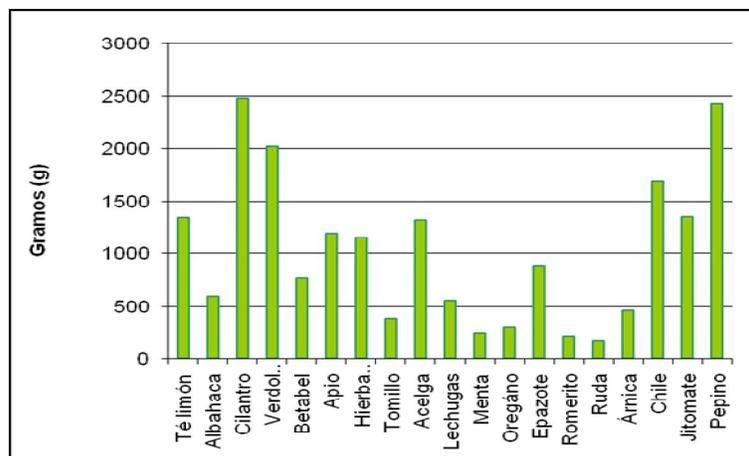
### 6.3. RESULTADOS

En modulo de agricultura urbana se tuvieron 19 diferentes cultivos de los cuales, 15 fueron del grupo de tallos y hojas, tres cultivos fueron del grupo de frutos y un solo cultivo (árnica) del grupo de flores, en la Ilustración 6.45., se presentan la gráfica producción y el porcentaje de cada uno de ellos.



**Ilustración 6.45.** Gráfica de producción por grupos de cultivos.

Los tres cultivos más productivos fueron: cilantro, pepino, y verdolaga; y los cultivos con menor producción fueron menta, romerito y ruda. En la Ilustración 6.46. se presenta la producción total de cada uno de los cultivos.



**Ilustración 6.46.** Producción total de cada uno de los cultivos.

A todos los cultivos se les realizó un mínimo de cuatro cortes (a excepción de una maceta de verdolaga). Los resultados de producción obtenidos en los dos modelos físicos utilizados se encuentran en los siguientes cuadros, en los cuales se muestran los rendimientos de cada especie por dispositivo, y por nivel.

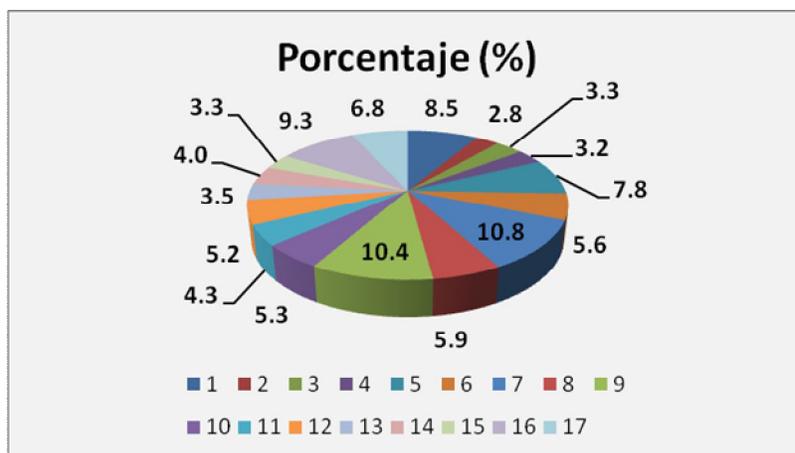
### 6.3.1. *Árbol de producción*

En un área de 0.79 m<sup>2</sup>, 17 macetas de distinta capacidad (8" y 10"), y 8 cultivos distintos, el primer nivel (piso inferior) del árbol de producción es el más grande (de tres niveles) y con más macetas, los resultados de las cosechas realizadas s este nivel se muestran en el cuadro 6.10.

**Cuadro 6.10.** Calendario de cosechas del primer nivel en el árbol de producción.

#	Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)
		Semana/gramos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Té limón	88.7			36.9		88.7			99.7		314.0
2	Albahaca	11.5			21.1		30.7			40.3		103.6
3	Chile			13.5		31.2		42.3		36.8		123.8
4	Chile			19.1		31.0		31.3		35.4		116.6
5	Té limón	56.3			80.5		90.0			60.2		287.0
6	Verdolaga			80.4		25.2		71.9		30.3		207.8
7	Té limón	132.5			81.9		102.9			82.4		399.7
8	Verdolaga				69.1		28.1			100.3	20.5	218.0
9	Betabel	169.0				70.3		64.9			79.5	383.7
10	Apio	33.0				29.1		88.7			43.4	194.2
11	Albahaca	39.0			52.1		35.3			33.6		160.0
12	Hierbabuena	78.5			42.2			46.8			24.1	191.6
13	Hierbabuena	25.2			23.2			38.9			42.8	130.1
14	Chile			32.0		45.6		33.8		36.3		147.7
15	Chile			16.1		36.4		17.1		53.5		123.1
16	Té limón	155.2			19.5		63.1			106.7		344.5
17	Árnica			55.5	47.4	36.0		38.7		43.1	30.8	251.5
<b>Total (g)</b>		788.9		216.6	473.9	304.8	438.8	474.2		758.6	241.1	<b>3696.9</b>

De este nivel la maceta más productiva fue la número 7 (té limón), esta maceta tuvo el 10.8 % del total de la producción, le siguieron la maceta número 9 (betabel para hojas) y la maceta 16 (té limón) con una productividad del 10.4% y 9.3 % respectivamente. La maceta con menor producción fue la maceta número 2 (albahaca) con el 2.8 del total de la producción (Ilustración 6.47.).



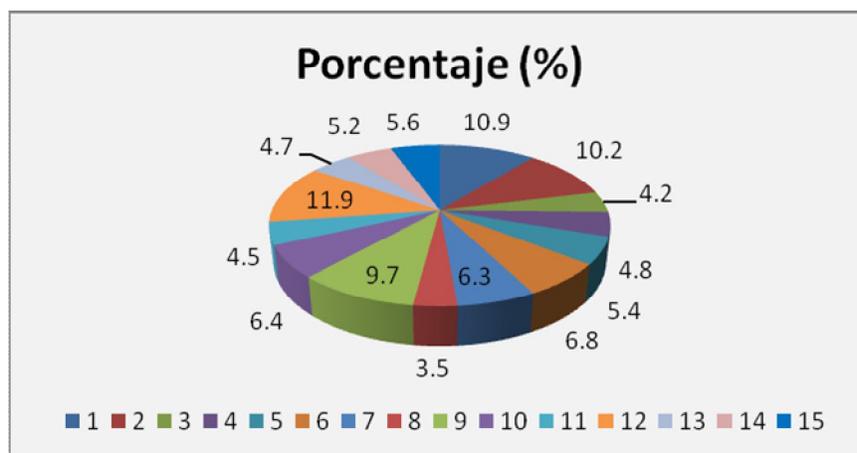
**Ilustración 6.47.** Producción de los cultivos del primer nivel del Árbol de producción.

El cuadro 6.11. muestra los resultados obtenidos de las cosechas realizadas al segundo nivel del árbol de producción, este nivel cuenta con un total de 15 macetas (todas de 8") acomodadas en un área de 0.64 m<sup>2</sup>, y nueve especies distintas.

**Cuadro 6.11.** Calendario de cosechas del segundo nivel en el árbol de producción.

#	Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)
		Semana/gramos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Apio	150.6			43.3		108.5			104.3		406.7
2	Betabel	46.2				94.3		191.7			48.0	380.2
3	Albahaca	57.2			61.4		19.1			16.9		154.6
4	Tomillo	36.4			59.0		34.8			48.9		179.1
5	Tomillo	48.4			72.8		32.7			45.8		199.7
6	Acelga				78.8		98.6		37.9		36.3	251.6
7	Acelga				56.2		91.5		38.8		47.8	234.3
8	Chile			10.3		23.2		40.5		54.87		128.9
9	Lechuga	125.6			83.2		100.4			50.1		359.3
10	Menta	47.5			66.5			86.0			39.3	239.3
11	Chile			32.7		19.8		64.4		50.0		166.9
12	Apio	136.3			149.6		82.8			72.3		441.0
13	Albahaca	50.0			33.0		41.4			49.8		174.2
14	Lechuga	43.2			62.4		42.3			44.4		192.3
15	Árnica			13.2		41.0	31.3	36.0		48.5	37.3	207.3
<b>Total (g)</b>		741.4		56.2	766.2	178.3	683.4	418.6	76.7	585.87	208.7	<b>3715.4</b>

De este nivel la maceta número 12 (apio) fue la que mayor producción tuvo en un lapso de 3 meses, ésta tuvo el 11.9 del total de la producción (Ilustración 6.48.).



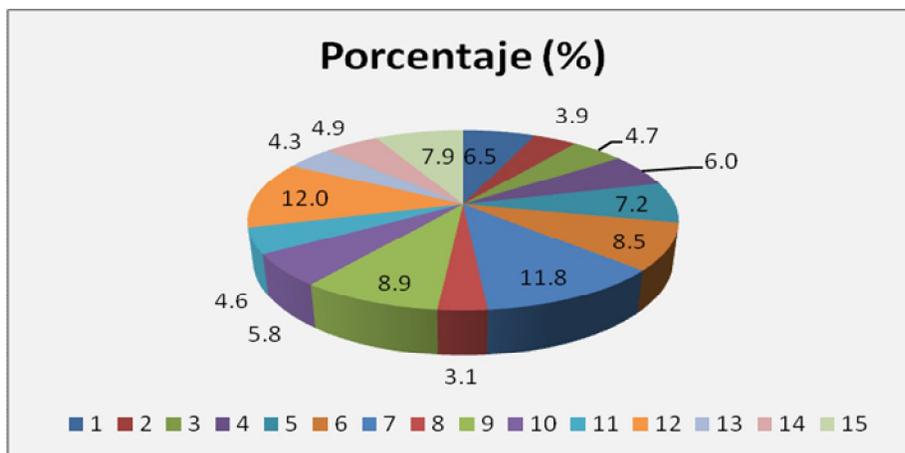
**Ilustración 6.48.** Producción de los cultivos del segundo nivel del Árbol de producción.

Los datos en el cuadro 6.12., muestran los gramos cosechados a cada cultivo del tercer nivel del árbol de producción (nivel superior), estos datos fueron obtenidos de 10 cultivos distintos colocados en 12 macetas, acomodadas en 0.57m<sup>2</sup>.

**Cuadro 6.12.** Calendario de cosechas del tercer nivel en el árbol de producción.

#	Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)	
		Semana/gramos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	Hierbabuena			46.8			28.0				65.6		224.8
2	Orégano	30.0			28.1		37.9				39.9		135.9
3	Orégano	27.7			22.3		53.4				60.6		164.0
4	Chile			40.1		38.4		65.4			63.0		206.9
5	Verdolaga				76.7		35.7				108.0	28.2	248.7
6	Verdolaga				32.6		68.8				89.8	103.4	294.6
7	Epazote	57.3			87.1		116.9				146.7		408.0
8	Jitomate						25.0	15.0	32.8			34.8	107.6
9	Epazote	95.0			59.0		90.3				64.7		309.0
10	Romerito			83.2		18.1		39.0			59.9		200.2
11	Ruda			43.0		52.0		24.0			42.3		161.3
12	Verdolaga			151.6		(83.2)							234.8
13	Apio	37.6				(44.8)		38.3				27.1	147.8
14	Epazote	38.3			24.1		44.2				64.3		170.9
15	Chile			54.3		63.8		73.3			82.8	332.7	274.2
<b>Total (g)</b>		332.7		358.0	300.3	472.3	320.6	32.8	822.0	277.9	332.7		<b>3288.8</b>

De este nivel (tercero) la maceta número 12 (verdolaga) fue la más productiva, ya que produjo el 12 % del total de la producción, la maceta que menor producción tuvo fue la número 8 (jitomate), esta maceta produjo el 3.1 del total de la producción del tercer nivel del árbol de producción (Ilustración 6.49.).



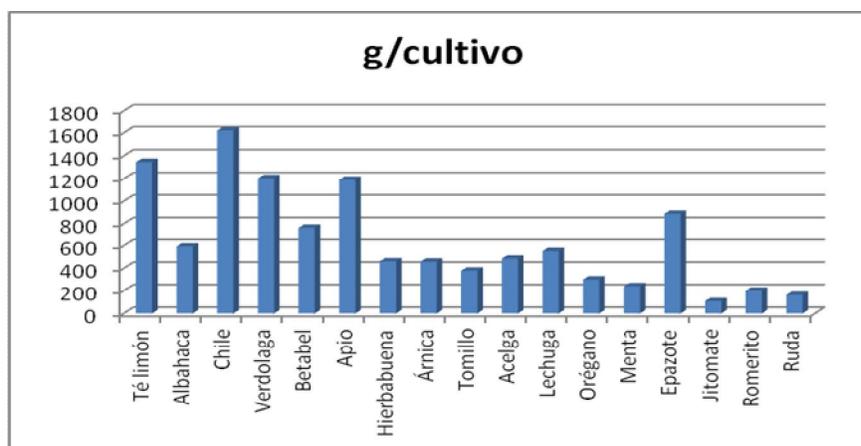
**Ilustración 6.49.** Producción de los cultivos del tercer nivel del Árbol de producción.

El cuadro 6.13. muestra los resultados totales obtenidos del árbol de producción, considerando todos los cultivos allí producidos, a excepción de la segunda semana, en todas las demás hubo una cosecha de distintos cultivos.

**Cuadro 6.13.** Resultados obtenidos del árbol de producción.

Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)
	Semanas/gramos										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Té limón	432.7			218.8		344.7			349.0		1345.2
Albahaca	157.7			167.6		126.5			140.6		592.4
Chile			218.1		289.4		368.1		412.7	332.7	1621.0
Verdolaga			232.0	178.4	108.4	132.6	71.9		328.4	152.1	1203.8
Betabel	215.2				164.6		256.6			127.5	763.9
Apio	357.5			192.9	73.9	191.3	127.0		176.6	70.5	1189.7
Hierbabuena	103.7		46.8	65.4		28.0	85.7		65.6	66.9	462.1
Árnica			68.7	47.4	77.0	31.3	74.7		91.6	68.1	458.8
Tomillo	84.8			131.8		67.5			94.7		378.8
Acelga				135.0		190.1		76.7		84.1	485.9
Lechuga	168.8			145.6		142.7			94.5		551.6
Orégano	57.7			50.4		91.3			100.5		299.9
Menta	47.5			66.5			86.0			39.3	239.3
Epazote	190.6			170.2		251.4			275.7		887.9
Jitomate						25.0	15.0	32.8		34.8	107.6
Romerito			83.2		18.1		39.0		59.9		200.2
Ruda			43.0		52.0		24.0		42.3		161.3
<b>Total (g)</b>	<b>788.9</b>		<b>216.6</b>	<b>473.9</b>	<b>304.8</b>	<b>438.8</b>	<b>474.2</b>	<b>109.5</b>	<b>758.6</b>	<b>241.1</b>	<b>3806.4</b>

De los resultados obtenidos en el cuadro 6.13., se realizó la Ilustración siguiente (Ilustración 6.50.), en la cual se observa que el cultivo más productivo fue el de chile, y el menos productivo fue el cultivo de jitomate.



**Ilustración 6.50.** Producción total del árbol de producción.

### 6.3.2. Cajonera vertical de producción

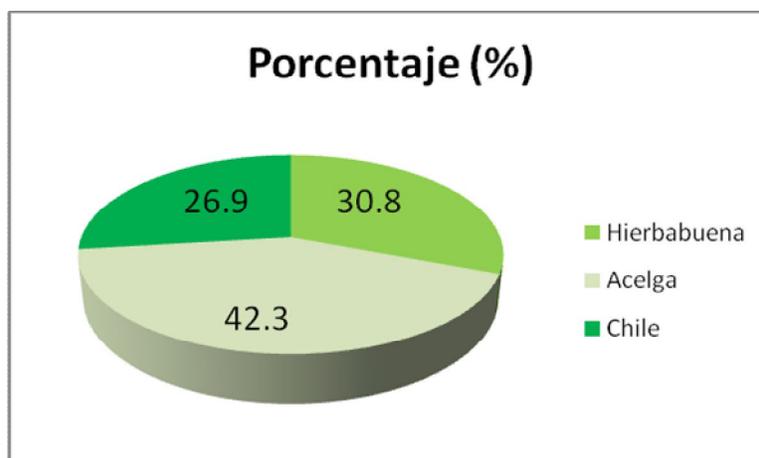
Se hicieron tres modelos físicos de este tipo, cada uno con tres niveles de producción colocados verticalmente, con una superficie de 0.165 m<sup>2</sup> por cada nivel, se le realizaron cortes durante 10 semanas.

En la cajonera número uno, se colocaron los cultivos de hierbabuena, acelga y chile en el primer, segundo y tercer nivel respectivamente, los datos obtenidos de las cosechas se muestran en el cuadro 6.14.

**Cuadro 6.14.** Resultados obtenidos en la cajonera número uno.

Nivel	Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)
		Semana/gramos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Superior	Hierbabuena	170.0			171.7			113.2			150.2	605.1
Medio	Acelga				328.3		65.5		273.1		164.9	831.8
Inferior	Chile			215.3		106.3		95.4		112.2		529.2
<b>Total (g)</b>		170.0		215.3	500	106.3	65.5	208.6	273.1	112.2	315.1	<b>1966.1</b>

En el 1er. Nivel de la cajonera se tuvo una producción de 1966.1 g en de la cual el 42.3 % correspondió al cultivo de acelgas, el cultivo de hierbabuena a pesar de tender a extenderse en todo el área de producción (interior del guacal) solo tuvo el 30.8 % y el 26.9 % restante correspondió al cultivo de chile, en la Ilustración 6.51., se presenta la gráfica.



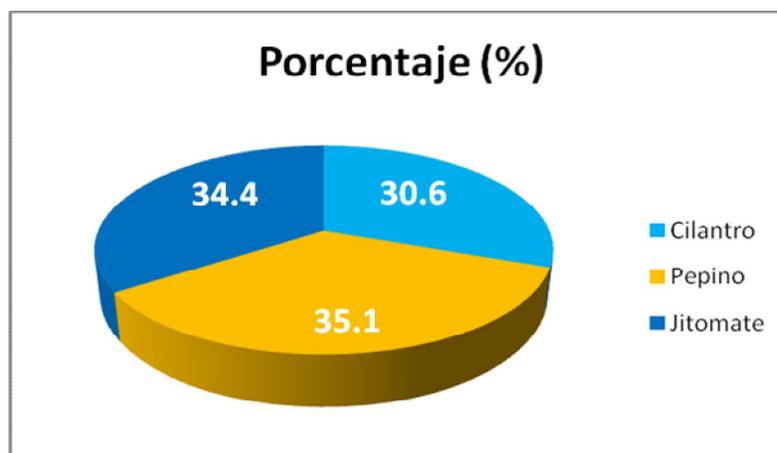
**Ilustración 6.51.** Producción total de Cajonera 1.

En la cajonera número dos, se colocaron los cultivos cilantro, pepino y jitomate, en el primer, segundo y tercer nivel respectivamente, los datos obtenidos de las cosechas se muestran en el cuadro 6.15.

**Cuadro 6.15.** Resultados obtenidos en la cajonera número dos.

Nivel	Cultivo	Jun	Jul					Ago				Total (g)
		Semana/gramos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Cilantro		416.0		213.2			201.9			274.6	1105.7
2	Pepino				106.0		506.0		456.4		200.3	1268.7
3	Jitomate						250.0	284.7	332.6		375.3	1242.6
<b>Total (g)</b>			416.0		319.2		756.0	486.6	789.0		850.2	<b>3617.0</b>

En la Cajonera 2 tuvo productividad de 3617 g, el cultivo con mayor producción fue el de pepino (35.1 %), seguido del cultivo de jitomate (34.4 %) y el cultivo con menor productividad fue el de cilantro (30.6 %), aunque los tres cultivos mostraron una productividad similar (Ilustración 6.52.).



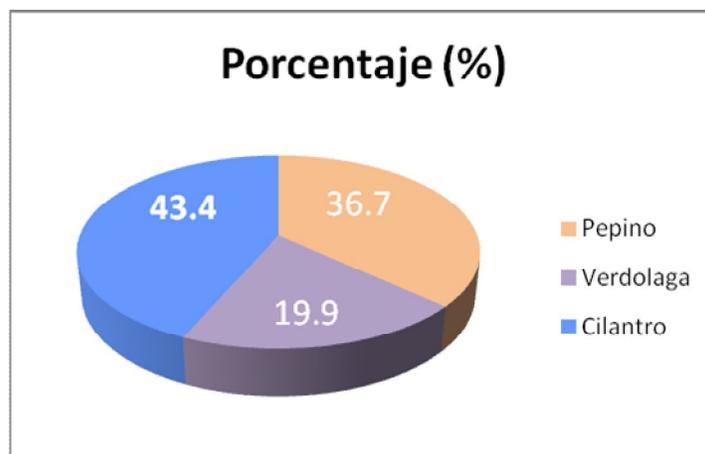
**Ilustración 6.52.** Productividad de Cajonera 2.

En la cajonera número tres, se colocaron los cultivos de Pepino, verdolaga y cilantro en el primer, segundo y tercer nivel respectivamente, los datos obtenidos de las cosechas se muestran en el cuadro 6.16.

**Cuadro 6.16.** Resultados obtenidos en la cajonera número tres.

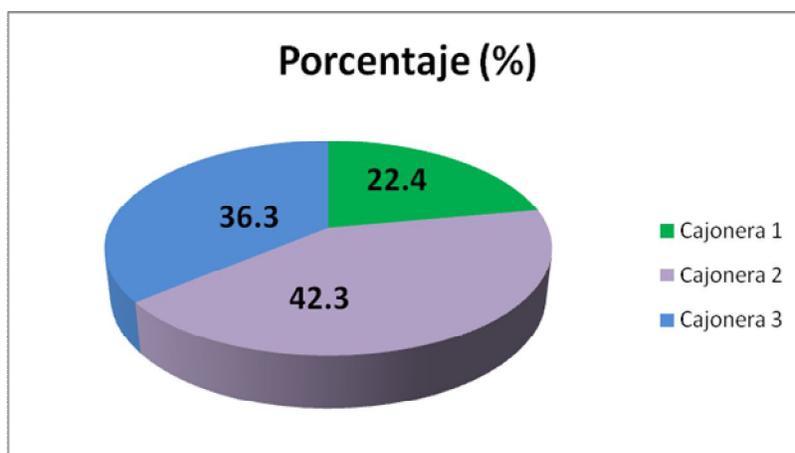
Nivel	Cultivo	Jun		Jul				Ago				Total (g)
		Semana/gramos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Pepino				53.0		413.0		546.0		156.2	1168.2
2	Verdolaga			293.6		71.2		139.3		128.3		632.4
3	Cilantro	513.7			348.5			229.3			289.3	1380.8
<b>Total (g)</b>		513.7		293.6	401.5	71.2	413.0	368.6	546.0	128.3	445.5	<b>3181.4</b>

El cultivo de cilantro en la Cajonera 3 fue el de mayor producción (43.4 %) de un 100 % correspondiente a 3181.4 g, aún por arriba de pepino (36.7 %), y el de menor productividad fu el cultivo de verdolaga, el cual tuvo una producción total de 632.4 g (19.9 %), estos datos se presentan en la Ilustración 6.53.



**Ilustración 6.53.** Productividad de Cajonera 3.

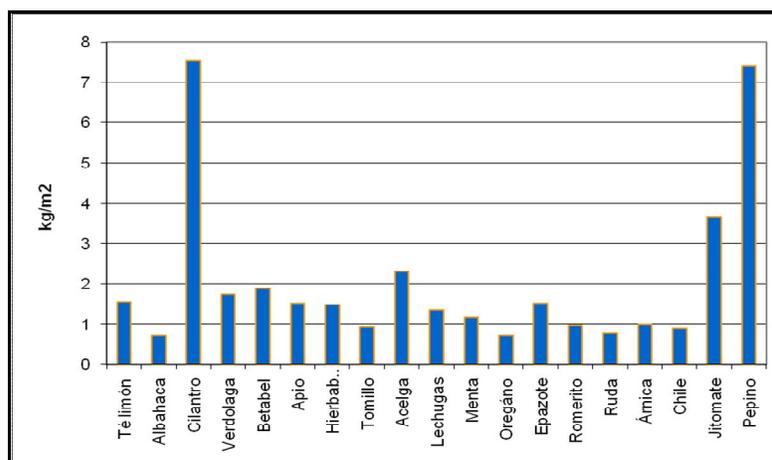
De las tres cajoneras consideradas en la producción, la cajonera número 2 fue la cajonera con mayor producción de las tres, ya que tuvo una producción de 3617 g, lo que corresponde al 42.3 de la producción total de las cajoneras, este modelo incluyo a los cultivos de pepino, verdolaga y cilantro, en segundo lugar de producción quedo la cajonera número 3, con una productividad de 36.3 %, y en tercer lugar quedo la cajonera número 1 con el 22.4 % (Ilustración 6.54.).



**Ilustración 6.54.** Producción total de cajoneras.

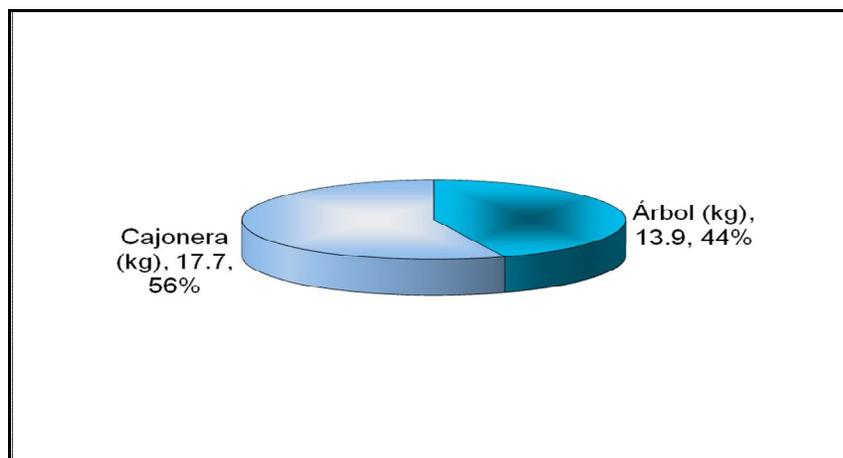
### 6.3.3. Producción en general

La producción por el área ocupada de cada cultivo se muestra en la Ilustración 6.55., y se observa que el cultivo más productivo es cilantro, y el menos productivo es albahaca, produciendo  $7.59 \text{ kg/m}^2$  y  $0.73 \text{ kg/m}^2$  cada uno respectivamente, el promedio de rendimiento de los cultivos fue de  $2.06 \text{ kg/m}^2$ .



**Ilustración 6.55.** Rendimiento de los cultivo en  $\text{kg/m}^2$ .

Considerando la producción por  $\text{m}^2$  de ambos modelos físicos de producción, la cajonera fue más productiva que el árbol (Ilustración 6.56.), ya que las producciones por  $\text{m}^2$  fueron de  $17.7 \text{ kg}$  (56 %) y  $13.9 \text{ kg}$  (44 %) respectivamente.



**Ilustración 6.56.** Rendimiento en Kg/m<sup>2</sup> de los modelos físicos.

Con respecto a la solución nutritiva utilizada en la producción de los cultivos, no se presentaron deficiencias nutrimentales, tampoco una toxicidad por parte de los fertilizantes y las cantidades utilizadas.

Algunos cultivos de siembra directa fueron afectados por la deficiencia de luz al momento de emerger, el cilantro se “alargó” cuando hubo un sombreado, ocasionando plantas más débiles de los tallos, acame de las plantas, y una deficiencia de pigmentación ocasionada a la ausencia de luz necesaria para el desarrollo del cultivo.

#### 6.3.4. Costos de producción

Los costos de producción anual de cada modelo físico son de \$921.4 y de \$334.39 para el árbol y la cajonera respectivamente, éstos se calcularon a partir de los precios de los productos utilizados en la producción de la huerta urbana, los precios de algunos de éstos productos se calcularon con una amortización de 3 y 5 años.

Los materiales utilizados y el costo de producción anual del árbol de producción (\$921.40 pesos), son mostrados en el cuadro 6.17., allí los precios son desglosados.

**Cuadro 6.17.** Costos anuales de producción del árbol.

Materiales	Descripción	Unidad	Costo unitario (\$)	Cantidad	Costo total
Macetas**	Estándar 7"	Pza	1.78	4.00	7.12
	Estándar 8"	Pza	3.15	38.00	119.70
	Estándar 10"	Pza	6.56	4.00	26.24
Tierra de monte	Bulto	lt	20.00	2.24	44.80
Tierra de hoja	Bulto	lt	20.00	2.24	44.80
Estructura***	Herrería	Pza	3500.00	1.00	350.00
Agua	---	m <sup>3</sup>	2.50	1.88	4.70
Fertilizantes	Nitrato de calcio	Kg	13.00	1.29	16.77
	Ácido fosfórico	Kg	21.00	0.17	3.57
	Sulfato de potasio	Kg	30.00	0.22	6.60
	Sulfato de magnesio	Kg	15.00	0.80	12.00
	Sulfato ferroso	Kg	12.00	0.020	0.24
	Sulfato de manganeso	Kg	30.00	0.005	0.15
	Bórax	Kg	25.00	0.006	0.15
	Sulfato de zinc	Kg	35.00	0.001	0.04
	Sulfato de cobre	Kg	62.50	0.001	0.06
Fungicidas	Azufre agrícola	Kg	90.00	0.28	25.20
	Captan	Kg	92.00	0.28	25.76
	Carbendazim	Kg	210.00	0.28	58.80
Insecticidas	Buprofezin	Kg	130.00	0.28	36.40
	Permetrina	Kg	80.00	0.28	22.40
	Flonicamid	Kg	340.00	0.28	95.20
Cultivos	Plántulas	Pza	0.60	32.00	19.20
	Semillas	g	0.10	15.00	1.50
<b>Costo total (un año)</b>					<b>921.40</b>

\*\* Precios amortizados a tres años. \*\*\* Precios amortizados a 10 años.

Considerando un ciclo de producción de cuatro meses para los cultivos, el costo por gramo y por kilogramo en el árbol de producción es de \$0.021 y de \$21.31 pesos respectivamente (cuadro 6.18.).

**Cuadro 6.18.** Costos por gramo y kilogramo producido.

Costo anual (\$)	Ciclos/año	Costo/ciclo (\$)	Gramos producidos	Kilogramos producidos	Costo/g (\$)	Costo/kg (\$)
921.4	4	230.35	10810.6	10.81	0.021	21.31

Los materiales utilizados y el costo de producción anual de la cajonera vertical (\$343.39 pesos), son mostrados en el cuadro 6.19., allí los precios son desglosados.

**Cuadro 6.19.** Costos anuales de producción de la cajonera.

Concepto	Descripción	Unidad	Costo unitario (\$)	Cantidad	Costo total
Guacales*	Madera (49cm x 30cm x 29cm)	Pza	5.00	3.00	15.00
Bolsa*	Plástico	Pza	1.25	1.00	1.25
Tierra de hoja	Bulto	lt	20.00	2.13	42.60
Tierra de monte	Bulto	lt	20.00	2.13	42.60
Estructura**	Herrería	...	1000.00	1.00	100.00
Agua	...	m <sup>3</sup>	2.50	0.45	1.12
Fertilizante	Nitrato de calcio	Kg	13.00	0.26	3.37
	Ácido fosfórico	Kg	21.00	0.03	0.73
	Sulfato de potasio	Kg	30.00	0.04	1.34
	Sulfato de magnesio	Kg	15.00	0.16	2.40
	Sulfato ferroso	Kg	12.00	0.004	0.05
	Sulfato de manganeso	Kg	30.00	0.001	0.03
	Bórax	Kg	25.00	0.001	0.03
	Sulfato de zinc	Kg	35.00	0.000	0.00
	Sulfato de cobre	Kg	62.50	0.000	0.01
Fungicidas	Azufre agrícola	Kg	90.00	0.14	12.60
	Captan	Kg	92.00	0.14	12.88
	Carbendazim	Kg	210.00	0.14	29.40
Insecticidas	Buprofezin	Kg	130.00	0.14	18.20
	Permetrina	Kg	80.00	0.14	11.20
	Flonicamid	Kg	340.00	0.14	47.60
Cultivos	Plántulas	Pza	0.60	2.00	1.20
	Semillas	g	0.10	9.00	0.90
<b>Costo total (un año)</b>					<b>343.39</b>

\* Precios amortizados a un año. \*\* Precios amortizados a 10 años.

Considerando un ciclo de producción de cuatro meses para los cultivos, el costo por gramo y por kilogramo en la cajonera vertical es de \$0.029 y de \$29.385 pesos respectivamente (cuadro 6.20.).

**Cuadro 6.20.** Costos por gramo y kilogramo producido.

Costo anual (\$)	Ciclos/año	Costo/ciclo (\$)	Gramos producidos	Kilogramos producidos	Costo/g (\$)	Costo/kg (\$)
334.39	4	85.85	2921.5	2.9215	0.029	29.385

### 6.3.5. Rendimiento de los cultivos en “Raciones de consumo”

Con la producción obtenida de 14 de los cultivos del árbol de producción, se elaboraron raciones de consumo y se estableció la periodicidad de consumo de cada uno de estos cultivos, para una familia tipo, conformada por cuatro miembros.

En el cuadro 6.21. se presentan los resultados de este procedimiento, con el cual se obtienen los rendimientos medidos en “raciones de consumo”.

**Cuadro 6.21.** Resultados del rendimiento en “raciones de consumo”.

Cultivo	Diámetro en pulgadas y cantidad de macetas			Área total de Producción (m <sup>2</sup> )	Producción Obtenida (g)	Número de cortes	Frecuencia de consumo (días)	Raciones obtenidas en 10 semanas
	7”	8”	10”					
Té limón		3	1	0.147	1345.2	4	5	24
Albahaca		4		0.128	592.4	4	7	10
Chile	1	5	2	0.287	1621.0	5	4	25
Verdolaga	1	3		0.121	1203.8	7	10	20
Apio	1	3		0.121	1189.7	7	15	7
Hierbabuena		3		0.096	462.1	7	4	7
Tomillo		2		0.064	378.8	7	15	20
Acelga		2		0.064	485.9	4	10	11
Lechuga		2		0.064	551.6	4	5	6
Orégano		2		0.064	299.9	4	7	25
Menta		1		0.032	239.3	4	5	11
Epazote	1	2		0.089	887.9	4	7	22
Romerito		1		0.032	200.2	4	15	13
Árnica		1	1	0.083	458.8	7	variable	18
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>34</b>	<b>4</b>	<b>1.392</b>	<b>9916.6</b>	<b>72</b>		<b>219</b>

En el cuadro 6.21., si analizamos el número de raciones obtenidas y la frecuencia de consumo, se puede observar, que en algunos cultivos se excedió de los requerimientos para la familia tipo y en otros cultivos no se cubrió el requerimiento para el periodo de las 10 semanas en las que se estuvo midiendo la producción, por lo tanto se requiere realizar un ajuste en cuanto al área o numero de macetas que se tienen sembradas de cada cultivo.

#### **6.4. CONCLUSIONES**

Con los “Modelos de agricultura vertical” es posible instalar un sistema de producción familiar en espacios muy reducidos (de 0.50 a 0.85 m<sup>2</sup>).

Las macetas y contenedores pueden reemplazar al suelo natural para la producción, pero solo en pequeña escala, para consumo familiar de algunos cultivos, ya que los 2.35 m<sup>2</sup> del área cultivada en el experimento, alcanzaron un peso de 528 kg.

Con una planeación adecuada de un Módulo de Agricultura Urbana, orientado a las preferencias de consumo familiar, de hortalizas de fruto y de hoja, así como hierbas aromáticas y medicinales, es posible cubrir los requerimientos de alrededor de 14 especies.

Los cultivos cosechados mediante un Módulo de Agricultura Urbana, pueden disponer de mejores condiciones de higiene, frescura y calidad, que los cultivos en condiciones normales de producción.

El riesgo de la presencia de plagas o enfermedades es una constante y la falta de experiencia para su detección y control oportuno, pueden representar fuertes fallas en el huerto familiar, las cuales se deben considerar.

Un Módulo de Agricultura Urbana por pequeño que sea, requiere de cuidados y trabajo diario, por lo tanto antes de establecerlo se debe de tomar esa responsabilidad familiar para atenderlo.

El establecimiento de un Módulo de Agricultura Urbana, puede proporcionar: aprendizaje, entretenimiento e integración familia



## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Andrade, F.H., Cirilo, A. G.; Uthart, S.A.; Otegui, M.E. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Ed. La Barrosa Dekalb Press. INTA, FCA UNMP. 292 p.
2. Acosta, J. A.; Acosta, E.; Padilla, S.; Goytia, M. A.; Rosales, R.; López, E. 1999. Mejoramiento de la resistencia a la sequía del frijol común en México. *Agronomía Mesoamericana* 10(1): 83-90.
3. Bänziger, M.; Edmeades, G.O.; Beck, D.; Bellon, M. 2000. Breeding for Drought and Nitrogen Stress Tolerance in Maize: From Theory to Practice. México D.F.: CIMMYT. 69 p.
4. Bruce, W.B.; Edmeades, G.O.; Barker, T.C. 2002. Molecular and physiological approaches to maize improvement to drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366): 13-25.
5. Camadro, E. L. 2003. Mejoramiento genético de hortalizas. Revista IDIA. Inta. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 5 pp.
6. Campos, H.; Cooper, M.; Habben, J.E.; Edmeades, G.O.; Schussler, J.R. 2004. Improving drought tolerance in maize: view from industry. *Field Crop Research* 90: 19-34.
7. Caraballo, R. A. 2003. Mejoramiento para resistencia a la sequia en el cultivo del arroz. Instituto de Investigaciones del Arroz (IIArroz). Autopista del Mediodía, Km 16 ½ Bauta, La Habana.
8. Castañón, G.; Cruz, R.; Del Pino, R.; Panzo, E.; Montiel, M.; Filobello, L. 2000. Selección de líneas de maíz por resistencia a sequía. *Agronomía Mesoamericana* 11(1): 163-169.
9. Celis H., J. 2000. Transgenia y seguridad ambiental. Universidad de Concepción. Concepcioó, Chile. 6 pp.
10. Chapman, S.; Cooper, M.; Podlich, D.; Hammer, G. 2002. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal* 95: 99 -113.
11. Cominelli, E.; Galbiati, M.; Tonelli, C.; Bowler, C. 2009 Water: the invisible problem. *EMBO Reports*. 10: 671–676.
12. Cominelli, E.; Tonelli, C. 2010. Transgenic crops coping with water scarcity. *New Biotechnology*. Dipartimento di Scienze Biomolecolari e Biotecnologie, Università degli Studi di Milano, Milano, Italy. 27(005): 473-477.
13. Davies, W.J.; Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Physiology Plant Mol. Biol.* 42: 55 - 76.
14. Debaeke, P.; Aboudrare, A. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *Europe Journal Agronomy* 21: 433-446.
15. Edmeades, G.O.; McMaster, G.S.; White, J.W.; Campos, H. 2004. Genomics and the physiologist: bridging the gap between genes and crop response. *Field Crop Research* 90: 5-18.

16. FAO. 2002. Crops and Drops: Making the best use of water for agriculture. World Food Day, Rome, Italy.
17. FAO. 2004. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2003-04. Roma, Italia.
18. Fernández P., F. J. 2006. Vegetales transgénicos: mitos y realidades desde una perspectiva técnica. Revista Fitotecnia Mexicana. Chapingo, México. 29(002): 95-102.
19. Freeman, B. A. 1985. Microbiología De Burrows. Traducido al español por Freeman, B. A. McGARW HILL Editor. D. F., México. 1181 p.
20. Fujita, M., Y. Fujita, Y. Noutoshi, F. Takahashi, Y. Narusaka, K. Yamaguchi-Shinozaki, and K. Shinozaki. 2006. Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: a current view from the points of convergence in the stress signaling networks. Current opinion in Plant Biology 9: 436-442.
21. Gaufichon, L.; Prioul, J. L.; Bachelier, B. 2010. What are the prospects for genetic improvement in drought-tolerant crop plants? Foundation pour l'agriculture et la ruralite dans le monde. Reconnue d'utilite publique. Paris, Francia. 57 p.
22. Gitay, H.; Brown, S.; Easterling, W.; Jallow, B. 2001. Ecosystems and their goods and services. In Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC (McCarthy, J.J. et al. eds), pp. 237–342, Cambridge University Press.
23. Hansen, G.; Shillito, R.D.; Chilton, M.D. 1997. T-strand integration in maize protoplast after codelivery of a T-DNA substrate and virulence genes. P. Natural Acad. Science. USA 95:11726-11730.
24. Hansen, G.; Chilton, M. D. 1999. Lesson in gene transfer to plants by a gifted microbe. In: Current Topics in Microbiology and immunology (Vol. 240) Plant Biotechnology: New Products and Applications. J Hammond, P B McGarvey, V Yusivob (eds). Springer-Verlag, Heidelberg, Alemania. pp: 21-57.
25. Herrera E., L. 1999. Transgenic plants for tropical regions: Some considerations about their development and their transfer to the small farmer. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. (96): 5978–5981.
26. Hocdé, H. 2006. Fitomejoramiento participativo de cultivos alimenticios en centro América: panorama, resultados y retos. Un punto de vista externo. Agronomía Mesoamericana 17(3): 291-308.
27. Ishitani, M.; Rao, I.; Wenzl, P.; Beebe, S.; Tohme, J. 2004. Integration of genomics approach with traditional breeding towards improving abiotic stress adaptation: drought and aluminum toxicity as case studies. Field Crop Res. 90: 35-45.
28. James, C. 2006. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2006. ISAAA Briefs. No 35. 94 p.
29. Kumar, A.; Singh, D.P.; Singh, P. 1994. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield of *Brassica juncea* L. Field Crop Res. 37: 95-101.
30. Larcher, W. 1995. Physiological Plant Ecology. 3rd ed. Springer-Verlag. 303 p.
31. López R., J.J. 2004. Apuntes de genotecnia vegetal. Chapingo, Edo. De Méx. 221 pp.

32. Magari, R.; Kang, M. 1993. Genotype selection via a new yield stability statistic in maize yield trials. *Euphytica* 70:105-111.
33. Márquez S., F.; Sahagún C., L.; Barrera G., E. 2009. Nuevo método de mejoramiento genético para resistencia a sequía en maíz. *Revista de Geografía Agrícola*. Universidad Autónoma Chapingo, México. (42): 9-14.
34. Mora, J. C.; García, L. M.; Sol, L. L.; Huerta, M. C. 2008. Ciencias de la tierra para la sociedad. *Geofísica*. No.8. UNAM. Chiapas, México. 3 pp.
35. Narváez R., L. 2001. Métodos de selección. **Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. 13 p.**
36. Nuez, F.; Pico B. 1998. Evolución de las técnicas de selección del material vegetal en la última década. *Revista Phytoma*. España. (100): 88-100.
37. Ortega R., R. 2005. Maíz transgénico: riesgos y beneficios. *Revista Universidad de Sonora*. Sonora, México. 41-43.
38. Petit, J.R.; Jouze, J.; Raynaud, D.; Barkov, N. I.; Barnola, J.-M.; Basile, I.; Bender, M.; Chappellaz, J.; Davisk, M.; Delaygue, G.; DELMOTTE, M.; Kotlyakov, V. M.; Legrand, M. Lipenkov, V. Y.; Lorius, C.; Pe´ Pin, L.; Ritz, C.; Saltzmann, E.; Stievenard, M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, (399): 429-436.
39. Ramirez V., P. 1992. Identification and estimation of heritabilities of drought related resistance traits in dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Ph. D. Diss. Michigan State Univ. East Lansing, Mi. USA. 320 p.
40. Ramírez R., V.; Guevara G., A. A. 2000. Biotecnología para el fitomejoramiento y la conservación. *Foresta veracruzana*. Universidad Veracruzana. Xalapa, México. 2(1): 51-54.
41. Rivas W., C. 2008. Plantas y cultivos transgénicos. 44 pp.
42. Rodríguez P., J. E.; Sahagún C., J.; Villaseñor M., H. E.; Molina G., J. D.; Martínez G., A. 2005. La interacción genotipo-ambiente en la caracterización de áreas temporales de producción de trigo. *Revista Agrociencia*. 39: 51-64.
43. Rodríguez R., P.; González R., O. 2007. Plantas transgénicas: una revisión de los principales cultivos básicos en México. Universidad de Guadalajara, Guadalajara México. *Revista Gnosis*, No. 5. 22 pp.
44. Rosales S., R.; Ramírez V., P.; Acosta G., J. A.; Castillo G., F.; Kelly, J. D. 2000. Rendimiento de grano y tolerancia a la sequía del frijol común en condiciones de campo. *Revista Agrociencia* 34: 153-165.
45. Ríos, S.; Morales, E.; Arroyo, A.; Villalobos M.A. 2008. Cultivo in vitro y análisis fenotípico de *Ceratodon stenocarpus*, un musgo mexicano con alta tolerancia a estrés osmótico. Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada-IPN. Tlaxcala, México. 1 p.
46. Sánchez M., T. 2008. Plantas transgénicas, biotecnología y alimentación. Universidad de Málaga, Departamento de Bioquímica y Biología molecular. Málaga, España 39 pp.
47. Saxena, N. P.; O'Toole, J. C. 2000. Field Screening for Drought Tolerance in Crop Plants with Emphasis on Rice. ICRISAT, Patancheru, India. The Rockefeller Foundation. 211 p.

48. Seki, M., T. Umezawa, K. Urano, and K. Shinozaki. 2007. Regulatory metabolic networks in Drought Stress Responses. *Current opinion in Plant Biology*. 10: 296-302.
49. Singh, S. P. 1985. Conceptos básicos para el mejoramiento del frijol por hibridación. In: *Frijol: Investigación y Producción*. López M., F. Fernández y A. Van Schoonhoven (eds.). Centro Internacional de Agricultura (CIAT). Cali, Colombia. 109 p.
50. Smith, R. H.; Hood, E. E. 1995. *Agrobacterium tumefaciens* transformation of monocotyledons. *Crop Science*. 35:301-309.
51. Umezawa, T.; Fujita, M.; Fujita, Y.; Yamaguchi-Shinozaki, K.; Shinozaki, K. 2006. Engineering drought tolerance in plants: Discovering and tailoring genes to unlock the future. *Current opinion in Biotechnology* 17: 113-122.
52. UNAM. 2000. *Las plantas transgénicas y la agricultura mundial*. Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
53. Valliyodan, B.; Nguyen, H.T. 2006. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current opinion in Plant Biology* (9): 189-195.
54. Warman, A. 1995. *La historia de un bastardo: maíz y capitalismo, México*. FCE. 283 p.
55. White, J.W.; McMaster, G.S.; Edmeades, G.O. 2004. ¿Genomics and crop response to global change: what have we learned? *Field Crop Research* (90): 165-169.
56. White, J.; Singh, S. 1991. Breeding for adaptation to drought. p. 501-560, In: A. van Schoonhoven and O. Voysest (eds.), *common bean: Research for crop improvement*. CAB-CIAT, Cali, Colombia.
57. Wilson, C. L.; Loomis, W. E. 1980. *Botánica*. Ed. Hispano Americana. D.F, México. 682 p.
58. Yang, R.; Baker, R. 1991. Genotype – environment interactions in two wheat crosses. *Crop Science*. (31): 83-87.
59. Zea, J. L.; Quemé, J. L.; Aguiluz, A.; Brizuela, L.; Córdova, H. 1991. Características agronómicas de línea S1 de maíz (*Zea mays* L.) evaluadas en tres ambientes de Centro América. *Agronomía Mesoamericana* (2): 11-18.
60. Agronomy series No. 11. (1967). *Irrigation of agricultural Lands*. American Society of agronomy. Winsconsin USA.
61. Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling*. Bull. No. 670. California Agric. Exp. Stn. Berkeley, CA.
62. Clemmens A. J. and Solomon K. H. (1997). Estimation of Global Irrigation Distribution Uniformity *J. Irrig. Drain Eng.* 123, 454 (1997); American Society of Civil Engineers, USA.
63. Ghinassi, Graziano (2008). *Manual for Performance Evaluation of sprinkler and Drip Irrigation Systems*. International Commission on Irrigation and Drainage. New Delhi, India.
64. Karmeli, D. Peri, G. Todes, M. (1985). *Irrigation systems design and operation*. Oxford University Press, cape town.

65. Montero J.\*y otros. (1995). Recomendaciones para un adecuado diseño y manejo de los sistemas de riego por aspersión. Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha, España.
66. Montero, J. (2000). Análisis de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersión estacionario: desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión. Universidad de Castilla La Mancha, España.
67. Peña P. E. (2011). Método para evaluar el desempeño de sistemas de riego por aspersión fijos y de movimiento intermitente. Memorias del XVI Congreso Nacional de irrigación. Culiacán Sinaloa, México.
68. Soil Conservation Service. Agricultural Handbook No. 82. (1956). United States Department of Agriculture. Washington DC.
69. Tarjuelo Martín-Benito, J. M. (1999). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
70. BAIXAULI S., C.; AGUILAR O., J. M. 2000. Cultivo sin suelo de hortalizas: Aspectos prácticos y experiencias. Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. 110 pp.
71. CALDERÓN S., F.; CEVALLOS, F. 2003. Los sustratos. Calderón Laboratorios Ltda. Bogotá, Colombia. 33 p.
72. FAO. 2003. La Huerta hidropónica popular, manual técnico. 3ª. Edición. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
73. FAO. 2004. Manual técnico, manejo integrado de enfermedades en cultivos hidropónicos. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
74. JENSEN, M. H. 1997. Principales sistemas hidropónicos: principios, ventajas y desventajas. Conferencia Internacional en Hidroponía Comercial. Tucson, Arizona, EUA.
75. SORIANO R., R. 2002. Agricultura Urbana en México: Situación y Perspectivas. División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM Iztapalapa, Departamento de Biología de la reproducción. D.F, México.
76. [http://www.hydroenvironment.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=34&chapter=2](http://www.hydroenvironment.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=34&chapter=2)