

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

INFORME FINAL DEL PROYECTO RD-1507.1

REGULACIÓN DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE CONTROLADOS EN ZONAS DE RIEGO SUBHÚMEDAS

JIUTEPEC, MORELOS, NOVIEMBRE DE 2015

Directorio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Felipe Arreguín Cortés
Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Nahun Hamed García Villanueva
Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Autores

M.I. Erickdel Castillo Solís
Jefe de Proyecto

M.C. José Rodolfo Namuche Vargas
Especialista en Hidráulica

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	1
2.	Objetivo	3
3.	Requerimientos en la regulación del régimen hídrico de los suelos	4
3.1.	Requerimientos de las plantas	4
3.2.	Requerimientos de los suelos	7
3.3.	Requerimientos de riego	8
3.4.	Requerimientos de drenaje	10
3.5.	Requerimientos del medio ambiente	11
3.6.	Requerimientos a satisfacer por los sistemas de riego y drenaje.....	11
3.7.	Necesidades de optimización del riego y de los parámetros de drenaje	14
4.	El riego y drenaje controlados	15
5.	Contribución del agua subterránea superficial al uso consuntivo de los cultivos.	31
5.1.	Flujo de agua en el suelo	33
5.2.	Raíces	35
5.3.	Cultivos.....	36
5.4.	Presencia de un sistema de drenaje	40
5.5.	Sistema de riego y su gestión	40
6.	Modelación y simulación.....	45
7.	Aspectos ambientales.....	50
7.1.	Efectos del drenaje en el ambiente	50
7.2.	Efectos en la hidrología	51
7.3.	Efectos en el transporte de sedimentos y nutrientes	52
7.4.	Transporte de pesticidas	56
7.5.	Impacto del drenaje en la calidad del agua superficial	56
7.6.	Efecto del drenaje controlado	56
7.7.	Impacto potencial del drenaje controlado en la calidad del agua superficial	60
7.8.	Efectos en la salud de los humanos	61
7.9.	Tratamiento y disposición del agua drenada	61
7.10.	Cambio climático.....	61
8.	Aspectos económicos.....	63
8.1.	Consideraciones económicas de los sistemas de drenaje	63

8.2.	Exigencias económicas en lo que respecta al riego de los suelos	63
9.	Lineamientos para establecer un experimento donde sea posible evaluar el aporte del agua freática al requerimiento de riego de un cultivo	64
10.	Conclusiones	70
11.	Bibliografía.....	73

Índice de figuras

Figura 1. Municipios con clima tipo trópico húmedo	1
Figura 2. Balance hídrico, Suchiate, Chiapas	2
Figura 3. Plano de isobatas del manto freático del DTT Huixtla, Chiapas.....	2
Figura 4. Ubicación de los Distritos de Temporal Tecnificado	2
Figura 5. Modelo conceptual del manejo del régimen de humedad en el suelo	4
Figura 6. Representación esquemática de la variación del rendimiento relativo ($Y=Y/Y_{max}$), en función de la humedad relativa ($W=W/m$).....	5
Figura 7. Representación esquemática de la relación entre el rendimiento relativo $Y = Y/Y_{max}$ en función de la profundidad media del manto freático Δ	6
Figura 8. Representación esquemática de la profundidad de desarrollo radical z en función de la profundidad del manto freático Δ	7
Figura 9. Gráfica esquemática del cambio del volumen de sustancias nutritivas lixiviadas $G = G/G_{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ y de la humedad del suelo W	8
Figura 10. Gráfica esquemática de los cambios de la lámina de riego I_r en dependencia de la profundidad de los niveles freáticos Δ , mantenida con auxilio de un sistema de drenaje.	14
Figura 11. Gráfica esquemática de cambios de la lámina de riego I_r en dependencia de la mineralización del agua de riego Cl_r	15
Figura 12. Diagrama esquemático del experimento	17
Figura 13. La influencia del riego y drenaje controlado en la altura del arroz en 2009 y 2010.	17
Figura 14. Respuesta de la tasa fotosintética (A y B), conductancia estomática (C y D), la tasa de transpiración (E y F), y el uso eficiente del agua de la hoja (G y H) en las diferentes etapas de arroz en 2009 y 2010.	18
Figura 15. Diagrama de la sección transversal del sistema de subirrigación por medio de zanja (Seep) y del sistema de riego subterráneo totalmente cerrado (FES).	20
Figura 16. Aplicaciones estacionales de agua (acumulativos) para el tratamiento y ET (Penman) para los años 1999, 2000, y 2001 en las estaciones experimentales (a, b, y c, respectivamente).	21
Figura 17. Diseño del experimento de campo.....	23
Figura 18. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de enero al 30 de abril de 1984.	24
Figura 19. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de mayo al 30 de septiembre de 1984.	24
Figura 20. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de octubre de 1984 al 31 de enero de 1985.....	25
Figura 21. Profundidad del nivel freático en el punto medio y profundidades acumuladas de lluvia, riego y drenaje para el sistema experimental 1, que opera bajo el método de control A.	27
Figura 22. Profundidad del nivel freático en el punto medio y profundidades acumuladas de lluvia, riego y drenaje para el sistema experimental 2, que opera bajo el método de control C.	28
Figura 23. Esquema del sistema de drenaje controlado y reversible	29
Figura 24. Montículo de agua - una sección transversal a través del centro de la parcela en paralelo a las líneas de drenaje, del 16 de julio de 1975.	30
Figura 25. Montículo de agua - una sección transversal a través del centro de la parcela en paralelo a las líneas de drenaje.	30
Figura 26. Efecto del nivel freático y textura del suelo en la evapotranspiración del agua subterránea poco profunda para el algodón.....	35
Figura 27. Aporte de agua subterránea para el cultivo de alfalfa en respuesta a los niveles de riego	41
Figura 28. Coeficientes de cultivo de algodón, en función de la calidad del agua subterránea y la profundidad de las aguas subterráneas.	42
Figura 29. Comportamiento de la profundidad del nivel freático, con diferentes profundidades iniciales del nivel freático.....	49
Figura 30. Flujos de agua en la zona radicular	50

Figura 31. Comparación de hidrogramas de escurrimiento para sitios desarrollados (sitios 101, 106), no desarrollados (102, 107), suelos minerales (sitios 101, 102) y orgánicos superficiales (sitios 106, 107).....	52
Figura 32. Hidrograma de escurrimiento para una lluvia de 3.25 cm ocurrida el 28 de febrero de 1983...	54
Figura 33. Nitrógeno total transportado anualmente en las aguas drenadas de 14 sitios en Carolina del Norte	55
Figura 34. Fósforo total transportado anualmente en las aguas drenadas de 14 sitios en Carolina del Norte	56
Figura 35. Mediciones de descarga del drenaje en 14 sitios de Carolina del Norte.....	58
Figura 36. Transporte de Aldicarb en el agua drenada influenciado por el tipo de sistema de drenaje y por la estructura de control.	59

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características principales del trópico húmedo.....	1
Cuadro 2. Comparación de las exigencias de las plantas, de los suelos y del medio ambiente en la regulación del régimen hídrico de los suelos bajo riego	13
Cuadro 3. Separación media estadística para los grados de tamaño de fruta de tomate y rendimiento. ...	22
Cuadro 4. Cultivos reportados en donde se utilizó exitosamente el agua subterránea poco profunda y las referencias bibliográficas.	37
Cuadro 5. Resumen de los estudios freáticos seleccionados que describen el uso de los cultivos de las aguas subterráneas poco profundas	39
Cuadro 6. Características hidrodinámicas del suelo	48
Cuadro 7. Resultados del archivo lamina1d.....	49
Cuadro 8. Eflujo anual de Nitrógeno y Fósforo de suelos cultivados, no desarrollados (Pinos) mineral y orgánico superficial (promedio de tres años)	53
Cuadro 9. Efecto del drenaje subterráneo en el eflujo de nitratos y fósforos de tres suelos similares cultivados en Carolina del Norte.....	53
Cuadro 10. Drenaje anual pronosticado, utilizando drenaje convencional y controlado en dos suelos.	57
Cuadro 11. Eflujo anual de nutrientes pronosticado, utilizando drenaje convencional y controlado en dos suelos.....	57
Cuadro 12. Estatus del drenaje convencional y controlado en estados con regiones húmedas con más del 1% del área total de tierras drenadas.....	60
Cuadro 13. Datos necesarios para caracterizar la aplicabilidad del patrón de cultivo para un uso in-situ de agua subterránea por los cultivos.....	64
Cuadro 14. Parámetros usados para evaluar la aplicabilidad del sitio para el uso del agua subterránea de los cultivos in-situ.....	65

1. Introducción

La tierra cultivable está disminuyendo debido a la salinización del suelo, erosión y la urbanización. Existe una necesidad para incrementar sustancialmente la producción de cultivos en las áreas húmedas, mientras que se requerirá de la agricultura de riego para proveer en más grandes proporciones alimento en las regiones áridas y húmedas. El drenaje subterráneo ofrece muchos beneficios que son necesarios para satisfacer estos cambios en áreas húmedas y áridas (Ayars y Evans, 2015).

Las tierras tropicales de México representan la frontera del desarrollo rural del país. La situación actual y el futuro prometedor de estas unidades de drenaje han sido recientemente enfatizadas por Contijoch (2003). En el trópico húmedo mexicano, se concentra el 70% de las tierras de mediano y alto potencial agrícola y el 65% de los recursos hidráulicos (IMTA, 2006). Esta área agrícola, sin embargo, presenta dos problemas físicos, el exceso de agua superficial y la limitada comunicación terrestre que se complica durante la época de lluvias.

De acuerdo con el trabajo de Wurck et al., citado por Ojeda e Íñiguez (2011), el trópico húmedo tiene una área de influencia de 34,239,016 ha, distribuida en 581 municipios de 14 estados del territorio nacional: Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán de Ocampo, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luís Potosí, Tabasco y Veracruz (figura 1 y cuadro 1).



Figura 1. Municipios con clima tipo trópico húmedo

Cuadro 1. Características principales del trópico húmedo.

Temperatura media anual	25 °C
Evaporación anual	1,200 mm
Precipitación anual	1,700 mm

En las zonas subhúmedas y en algunas partes de las zonas húmedas del trópico mexicano, aun cuando la precipitación anual es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos agrícolas generalmente las lluvias se concentran en un período de tiempo muy corto de la estación lluviosa (figura 2). Esto provoca por un lado problemas de exceso y por el otro déficit de humedad para los cultivos. Este exceso de lluvia en cierta época del año, provoca que los niveles freáticos asciendan, en algunos casos hasta la superficie del suelo (figura 3).

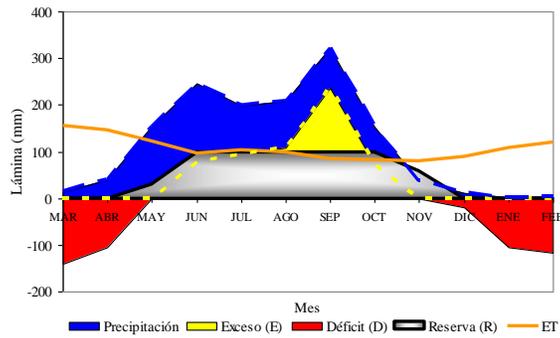


Figura 2. Balance hídrico, Suchiate, Chiapas

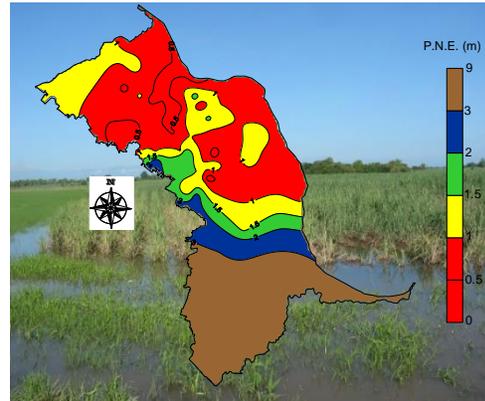


Figura 3. Plano de isobatas del manto freático del DTT Huixtla, Chiapas.

Con la finalidad de incorporar estas áreas con problemas de drenaje, localizadas en las zonas húmedas y subhúmedas tropicales del país, a la producción agropecuaria, fueron creados los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT). Existen 23 DTT (figura 4), que en el año agrícola 2010 registraron una superficie sembrada de 1,817,472.5 ha (CONAGUA, 2011), pero se estima que tiene un potencial de 7.5 millones de hectáreas (IMTA, 2006).

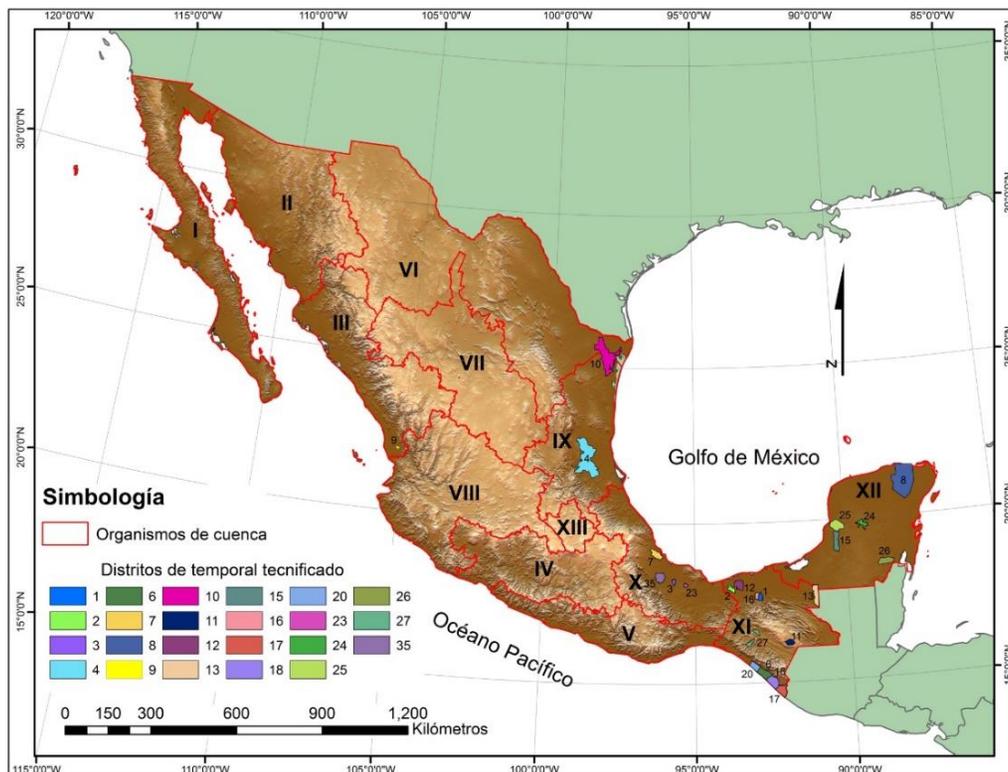


Figura 4. Ubicación de los Distritos de Temporal Tecnificado (CONAGUA 2011)

Es en la región del trópico húmedo y particularmente en los Distritos de Temporal Tecnificado, en donde, debido a sus condiciones climáticas (excesos y déficit de agua en cierta época del año) se necesita hacer un manejo adecuado del régimen de agua en el suelo, mediante el riego y drenaje controlado.

En las pasadas décadas, ha habido un considerable progreso en el mejoramiento del diseño y gestión de los sistemas de riego, sin embargo, ha habido poca investigación dedicada al diseño e implementación de mejoras de los sistemas y gestión integrada de los sistemas de drenaje subterráneo (Ayars y Evans, 2015).

Un problema de especial importancia surge cuando se tiene la necesidad de aplicar riego en los sistemas de drenaje, con el fin de intensificar la producción agrícola cuando existen períodos de sequía prolongada. Normalmente los cálculos del régimen de riego no se relacionan con los parámetros de drenaje, lo cual es incorrecto ya que el régimen de riego influye tanto sobre el régimen de humedad del suelo como sobre el régimen del manto freático. Igualmente de los parámetros de drenaje dependen en cierta medida el régimen de riego. Es decir existe una interacción entre los sistemas de riego y drenaje, por lo que al analizarlos es indispensable tomar en cuenta tales interacciones y hacer una optimización conjunta de los parámetros de drenaje y del régimen de riego. El riego en las zonas húmedas está menos difundido que el riego en las zonas áridas (COLPOS, 1989).

2. Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo revisar el estado del arte sobre prácticas y avances tecnológicos para la producción hidroagrícola mediante el control del régimen de humedad del suelo en zonas subhúmedas.

Específicamente se estudia el régimen de humedad en el suelo, incorporando de una forma integral, al riego y drenaje agrícola, tomando en cuenta las variables de la lluvia, el riego, la evapotranspiración, el aporte de agua del manto freático superficial y se examina el caso especial de la subirrigación, utilizando el sistema de drenaje subterráneo controlado (figura 5).

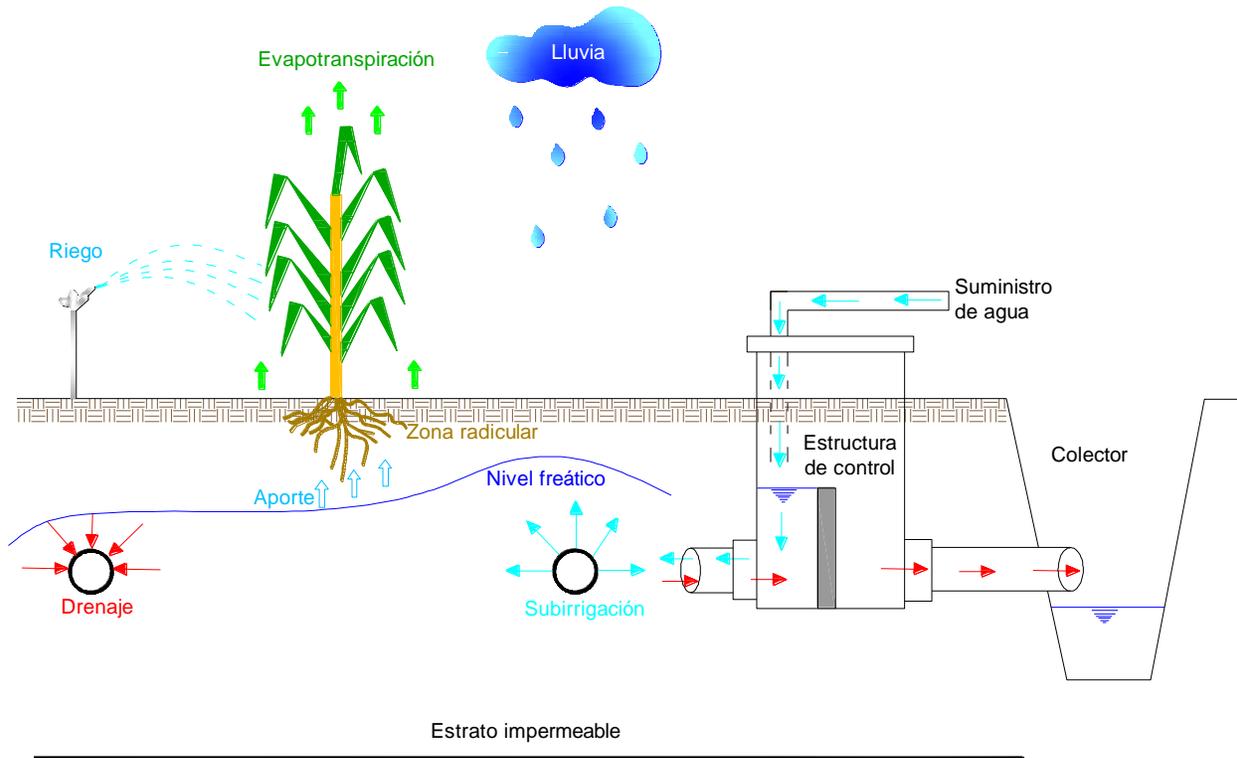


Figura 5. Modelo conceptual del manejo del régimen de humedad en el suelo

3. Requerimientos en la regulación del régimen hídrico de los suelos

En el año de 1989, los Doctores Yuri Nikolski y Yuri Sujarev, realizaron varias actividades durante una estancia en el Colegio de Postgraduados, dichas actividades fueron recopiladas por el Dr. Oscar L. Palacios, dando lugar al proyecto denominado “Regulación del régimen de humedad de los suelos con riego y drenaje” (COLPOS, 1989), parte de la información presentada en dicho proyecto se retoma en este capítulo.

3.1. Requerimientos de las plantas

El rendimiento de los cultivos varía fuertemente en función de la humedad del suelo (figura 6). Para la mayoría de los cultivos que se presentan en las zonas tropicales húmedas, la humedad óptima en la parte activa de la zona radical del suelo (en la cual se tiene no menos del 70 al 80% de toda la masa de raíces), en donde se alcanza la mayor productividad, se tiene cuando la humedad del suelo es de 60 al 80% de la porosidad. Una disminución de la humedad por debajo de un cierto valor óptimo conduce a una disminución del rendimiento debido a la falta de humedad en el suelo. Por el contrario, cuando se tiene un exceso de humedad por encima del valor óptimo las plantas sufren de una deficiencia de oxígeno en el aire del suelo.

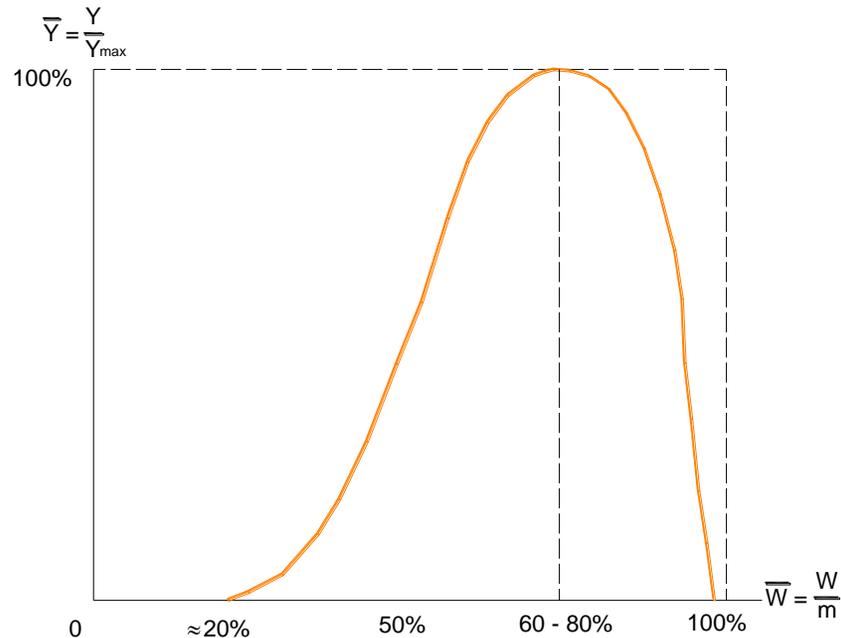


Figura 6. Representación esquemática de la variación del rendimiento relativo ($\bar{Y}=Y/Y_{\max}$), en función de la humedad relativa ($\bar{W}=W/m$). Donde, Y es el rendimiento, Y_{\max} es el rendimiento máximo (ambos en unidades de masa entre área, W es el contenido de humedad y m es la porosidad (ambos en porcentaje). Fuente: COLPOS,1989.

Cuando existen excesos de humedad, (arriba del valor óptimo) las plantas sufren de deficiencias de oxígeno en el aire del suelo. Con valores de mayores a 0.6 de la porosidad, considerablemente aumenta la intensidad del movimiento descendente de la humedad del suelo, y como resultado, aumentan fuertemente los gastos del agua de riego, y del suelo se lixivian intensamente no solamente las sales tóxicas, sino que también las sustancias nutritivas. Por eso, en los territorios bajo riego la humedad del suelo se mantiene siempre debajo del 80% de la porosidad (a veces no más arriba de 60 a 65%). Durante los procesos de desarrollo vegetativo, en las diferentes etapas de su desarrollo, los cultivos agrícolas requieren de diferentes niveles de contenidos de humedad. Las plantas reaccionan muy drásticamente cuando existen insuficiencias de humedad en los periodos de un crecimiento intensivo de biomasa (para los cultivos forrajeros esto sucede después de cada corte) y cuando hay excesos de agua en los periodos de floración. En general, el mantenimiento de la humedad del suelo en los límites (60 al 80% de la porosidad) permite obtener cosechas no menores del 80% de la cosecha potencial posible, para unos determinados suelos y cultivos. Entre mayor es el nivel de agrotécnia, con mayor cuidado se debe regular el régimen de humedad del suelo.

Entre mayor es la fertilidad del suelo, y entre mayor cantidad de fertilizantes se introducen, menor es el gasto de agua para la obtención de una unidad de sustancia seca de los cultivos. Surge la conveniencia de regular en toda su complejidad las condiciones de vida de las plantas para aumentar la efectividad del uso de los recursos hídricos mediante la introducción de un servicio agrotécnico intenso de los cultivos, utilización de altas dosis de fertilizantes orgánicos y minerales y mediante la utilización de un conjunto

de medidas adicionales sobre la economía del agua de riego (en particular, debido a la construcción de hileras de árboles rompe-vientos y otras).

El sistema radical del cultivo se desarrolla en función del tipo de plantas, del carácter de la distribución de humedad en el perfil del suelo, de la profundidad del manto freático (Δ), y de la distribución de sustancias nutritivas en el perfil del suelo. La masa principal de raíces generalmente se localiza en un horizonte de 0.5 a 0.7Δ , siempre y cuando la profundidad del manto freático sea $\Delta < 1.5$ metros. En la siguiente figura se muestra la relación entre el rendimiento relativo (\bar{Y}) y la profundidad del manto freático (Δ). La relación $\bar{Y}(\Delta)$ alcanza un máximo ($\bar{Y}=1$) cuando la profundidad del manto freático es igual a la óptima Δ_{opt} (la cual frecuentemente es cercana a 1m) y se obtiene un rendimiento menor cuando Δ es diferente a la óptima. La disminución del rendimiento cuando $\Delta < \Delta_{opt}$ está relacionado con un exceso de humedad en el suelo y una insuficiencia de oxígeno. En cambio la disminución del rendimiento cuando $\Delta > \Delta_{opt}$ está relacionado con un posible déficit de humedad del suelo en momentos específicos del periodo vegetativo de los cultivos, así como con el hecho de que existirán movimientos de humedad descendentes, lo que significa que se lavan elementos nutritivos hacia los mantos freáticos.

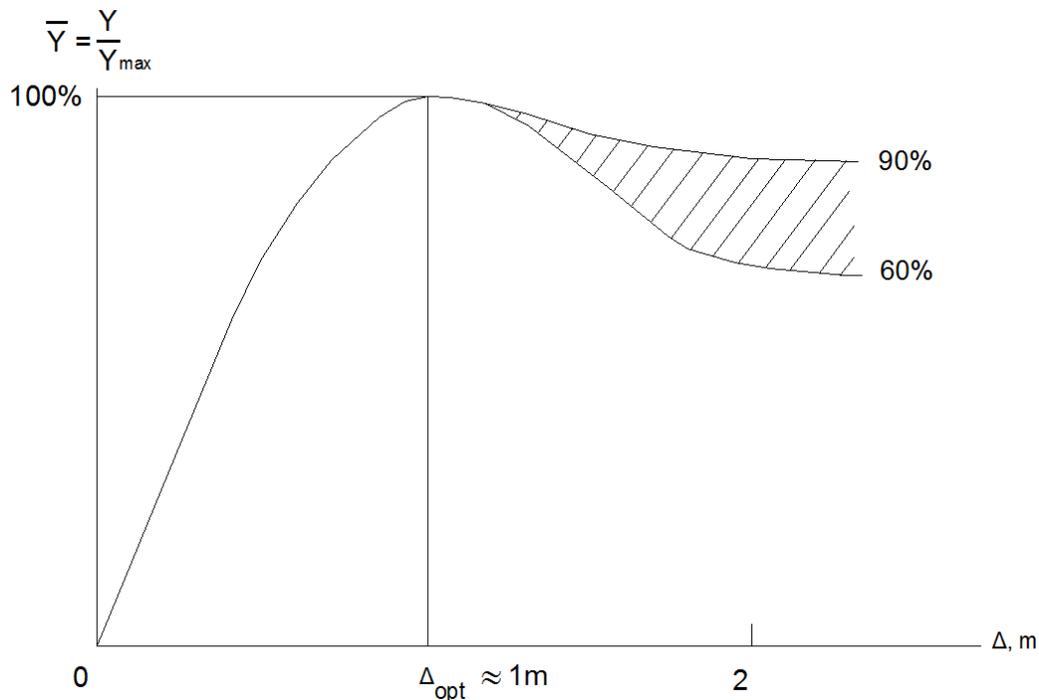


Figura 7. Representación esquemática de la relación entre el rendimiento relativo $\bar{Y} = Y/Y_{max}$ en función de la profundidad media del manto freático Δ (se han sombreado los límites típicos de \bar{Y} , cuando $\Delta > \Delta_{opt}$).
Fuente: COLPOS, 1989.

La superficie del nivel freático es un obstáculo para el desarrollo de las raíces, como se puede observar en la figura 8. Cuando existen limitaciones a la profundidad del desarrollo de las raíces (z), esto conduce a una disminución notable del rendimiento (Y), y a una

mayor dependencia del rendimiento del cultivo en relación al estado del suelo (en particular de los regímenes hídricos, aéreo y de sustancias nutritivas).

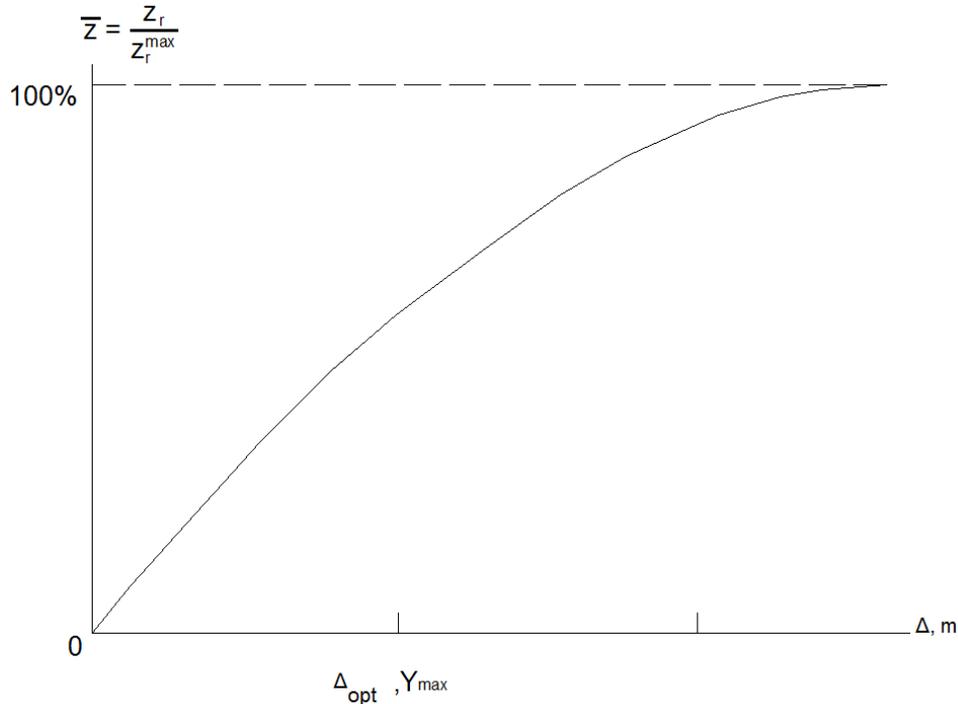


Figura 8. Representación esquemática de la profundidad de desarrollo radical $\bar{z} = z_r/z_r^{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ . Fuente: COLPOS, 1989.

3.2. Requerimientos de los suelos

El drenaje de los suelos con exceso de agua, cambia los procesos que se observan en el mismo, así como su fertilidad. La acción del drenaje sobre la fertilidad de los suelos es doble. Por un lado, al remover los excesos de agua se generan procesos aeróbicos, las sustancias nutritivas se oxidan y pasan a formas accesibles para las plantas, se acelera la descomposición de la materia orgánica y el suelo se abastece de nuevos elementos nutritivos minerales. Todo esto conduce al aumento de la fertilidad de los suelos. Por otro lado, la aceleración del escurrimiento superficial puede provocar la erosión del suelo. El drenaje frecuentemente conduce a un aumento del régimen de lavado de los suelos (particularmente cuando el drenaje está relacionado con un abatimiento de nivel freático). Esto conduce a un cambio de la dirección de proceso de formación de suelos y al aumento de la lixiviación de sustancias alimenticias hacia las aguas freáticas y hacia los efluentes de drenaje.

En la figura 9, se muestra esquemáticamente la gráfica del cambio del volumen de sustancias químicas nutritivas lixiviadas del suelo hacia el manto freático $\bar{G} = G/G_{max}$, en función de la profundidad el manto freático Δ y de la humedad del suelo W . La lixiviación de sustancias nutritivas tiene lugar de manera más intensa entre mayor sea Δ y W . En

orden descendente, la intensidad de lixiviación de diferentes sustancias nutritivas es aproximadamente como sigue: CaO, NO₃, K₂O, NH₄, materia orgánica, P₂O₅. El régimen de lavado que se agudiza como resultado del drenaje puede conducir no solamente a la lixiviación de sustancias minerales sino a un empeoramiento de la composición del complejo de intercambio, a la acumulación de los cationes Fe, Al, H, Mg. Para aumentar la fertilidad de los suelos drenados es indispensable disminuir su régimen de lavado. Para esto debe aumentarse el escurrimiento superficial.

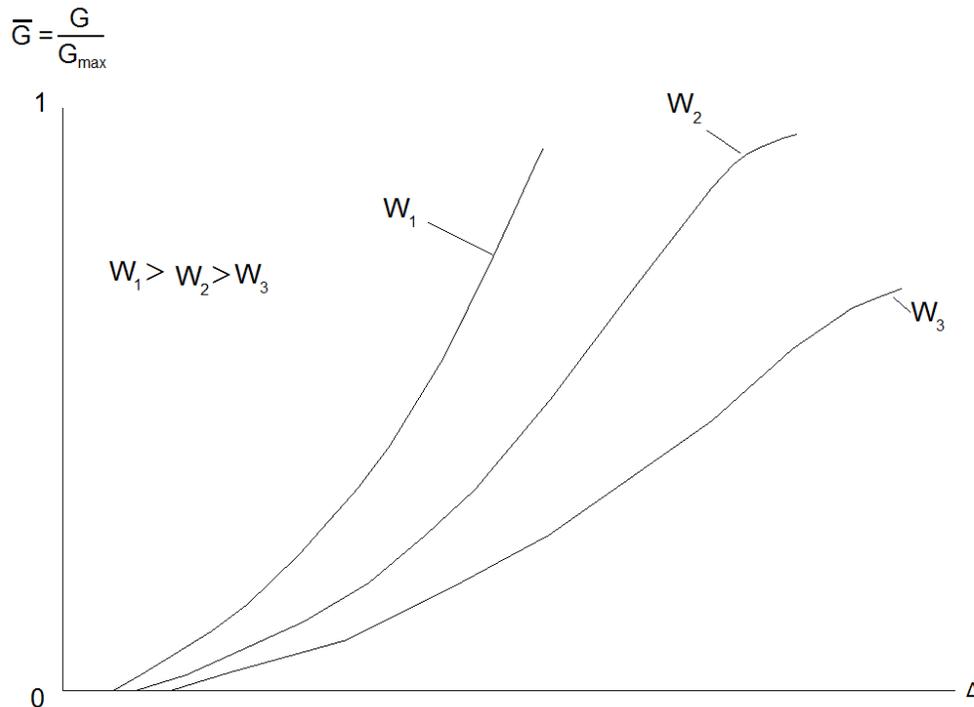


Figura 9. Gráfica esquemática del cambio del volumen de sustancias nutritivas lixiviadas $\bar{G} = G/G_{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ y de la humedad del suelo W . Fuente: COLPOS, 1989.

Cuando se tienen niveles freáticos cercanos a la superficie de los suelos debido a un ascenso capilar intenso se empeora el régimen salino de los suelos y se limita la zona de distribución del sistema radicular de los cultivos, esto provoca que disminuyan las cosechas. Cuando se tienen aguas freáticas profundas debido al flujo descendente continuo de la humedad del suelo, se lixivian hacia abajo las sustancias nutritivas. La disminución de la cosecha máxima con el caso $\Delta > \Delta_{opt}$ (en el cual se observa una cosecha máxima Y_{max}) es del orden de 10%.

3.3. Requerimientos de riego

El riego provoca una fuerte evapotranspiración (en comparación con las condiciones de temporal). Y como resultado de esto aumentan los gastos de calor para la evaporación y transpiración y por lo tanto ocurre una disminución de la temperatura del suelo y de las

plantas. La disminución de la temperatura del suelo condiciona también el aumento de la capacidad calorífica del suelo debido al aumento de su humedad. La disminución de la temperatura de manera positiva se refleja en el proceso formador de suelos y en el desarrollo de los cultivos. Un aumento de la humedad del suelo favorece también la actividad biológica de los microorganismos del suelo. El carácter de la actividad de los microorganismos del suelo y su efecto sobre el proceso formador del suelo depende de los diferentes intervalos de humedad del suelo y en que profundidad se encuentra el manto freático. Una sobresaturación de los suelos provoca una lixiviación intensa de sustancias nutritivas y un empeoramiento de la aeración (se desarrollan procesos anaeróbicos, que son indispensables para el proceso formador de suelos).

Durante el riego de grandes áreas, como resultado del aumento de evapotranspiración cambia el microclima e inclusive el mesoclima. Crece la humedad relativa, aumenta el balance de radiación, se iguala el curso diario de temperatura del aire (en el día la temperatura es más baja y en la noche la temperatura es más alta, en comparación con las condiciones de temporal).

Un aumento de la respiración de las plantas en los sistemas de riego conduce a cambios de la composición gaseosa del aire del suelo, y en algún grado cambia la atmósfera cercana a la superficie (en la cobertura del cultivo). Crece el contenido de bióxido de carbono. Para la actividad biológica en los suelos esto es un efecto negativo, sin embargo, para el desarrollo de la fotosíntesis de las plantas este efecto es positivo.

Es necesario utilizar el riego dentro de un complejo de medidas que comprenda otras formas de mejoramiento, dentro de las cuales se encuentran; la utilización de hileras de árboles rompe-vientos, coberturas vegetales con residuos vegetales, labranza mínima del suelo, una retención artificial del agua en el suelo, etc.

Durante la utilización para el riego de agua de alta calidad, con una entrega de agua rigurosa y normalizada y con el mantenimiento de las aguas freáticas a una profundidad suficiente (para proporcionar un régimen débil de lixiviación) se forma un régimen favorable hídrico-salino de los suelos y se crean condiciones para el crecimiento de su fertilidad. Cuando se utiliza agua con una mineralización alta, con una composición química poco favorable para los suelos con un contenido elevado de Na^+ , CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4 , o con un mantenimiento cercano a la superficie, de las aguas freáticas, puede presentarse una salinización secundaria de los suelos, sodificación, etc. Consecuencias negativas análogas pueden surgir, cuando se tienen niveles freáticos profundos. Cuando se utiliza agua de mala calidad y un régimen de entrega no correcto.

Para prevenir el efecto negativo del riego sobre los suelos es necesario el pronóstico de su régimen hídrico-salino. Para prevenir la acumulación de cloruros en el suelo, es necesario crear un régimen de lixiviación. Si la salinización está relacionado con la geología, litología, mineralogía de los suelos, entonces, además de una regulación del régimen hídrico es necesario utilizar métodos químicos de mejoramiento de los suelos. Con la utilización de un régimen de riego no correcto, la utilización de los

fertilizantes nitrogenados, puede no ser efectiva. Los fertilizantes nitrogenados serán utilizados de manera incompleta por las plantas.

Uno de los índices de fertilidad de los suelos es el número de la macrofauna del suelo (los invertebrados-nemátodos). El aumento en cantidad de la fauna en 10 veces conduce un crecimiento de la fertilidad del suelo y al aumento de la cosecha en dos veces. El riego propicia un aumento del número de la fauna del suelo, si la humedad del suelo se mantiene entre los límites (60-80% de la porosidad). Desviaciones con respecto a este intervalo en un menor o en un mayor grado conduce a un debilitamiento de la actividad biológica de la fauna del suelo y a una disminución de su cantidad.

Conjuntamente con las sales tóxicas de los suelos durante el riego se lixivian sustancias nutritivas. Para preservar las sustancias nutritivas, es necesario limitar la lixiviación de los suelos, por otro lado, para desalinizarlos, se necesita incrementar la lixiviación, particularmente si las aguas freáticas se encuentran a una profundidad menor de 2 metros.

Bajo el efecto del riego se modifica la alcalinidad de los suelos. La dirección de estos cambios depende del régimen de riego y de la composición química del agua de riego. El conjunto de propiedades agroquímicas de los suelos se indica con un índice generalizado de fertilidad (I_r) y este cambia bajo el efecto de riego.

El riego provoca también una intensificación de los procesos de respiración en el suelo (es decir una intensificación de la producción de bióxido de carbón de los suelos hacia la atmosfera debido a la actividad biológica de la microflora de los suelos). Y como resultado de esto la concentración de CO_2 , en el espesor de aire cercano a la superficie aumenta, y esto como consecuencia provoca una mayor actividad de la fotosíntesis y un aumento adicional de la cosecha.

En general, con el aumento del agua de riego que se proporciona hasta un determinado límite conduce a un aumento de la cosecha. Una entrega excesiva de agua puede conducir a una disminución de la cosecha debido a una sobresaturación del suelo y debido a una lixiviación intensa de sustancias nutritivas del suelo. En determinadas zonas climatológicas con una cantidad grande de precipitaciones (pero no suficiente para una completa satisfacción de las necesidades de las plantas) el riego, si este no es acompañado con la introducción de dosis completas de fertilizantes orgánicos y minerales y si en los territorios bajo riego la atención agrotécnica se proporciona en niveles bajos, puede provocar un aumento muy débil de la cosecha e inclusive disminuir la cosecha de los cultivo agrícolas.

3.4. Requerimientos de drenaje

Las sobreelevaciones del nivel freático (por ejemplo durante las lluvias), provocan una disminución del rendimiento, tanto mayor, cuanto más grande y prolongado es la sobre elevación del nivel freático. Esto es debido antes que nada a la liberación de sustancias

tóxicas que se generan en las condiciones anaeróbicas, sustancias tales como acetileno, etileno, metano y otras. La concentración de estos gases en el aire del suelo es más alta y el rendimiento más bajo entre más materia orgánica contenga el suelo, entre más alta sea la temperatura del mismo y entre más prolongado sea el periodo del exceso de humedad del suelo. Por esta razón durante el proyecto de drenaje es necesario considerar a la precipitación atmosférica, calcular el régimen de variación del nivel freático y procurar en lo posible, que las variaciones del nivel freático no sean muy considerables (orientativamente dentro de los límites de 0.2 a 0.3 de Δ_{opt}).

Los sistemas de drenaje deben permitir la utilización de maquinaria agrícola en los momentos en que lo requieran los cultivos. Para esto se requiere que la humedad del suelo no rebase un cierto valor crítico W_t . Es necesario que durante estas labores la humedad relativa del suelo $\bar{W} = \frac{W}{m}$ se encuentra dentro de los límites de aproximadamente 0.6 – 0.7.

3.5. *Requerimientos del medio ambiente*

Los sistemas de riego y drenaje deben proporcionar la posibilidad de una producción intensa y altamente efectiva de los cultivos agrícolas. Durante esto debe conservarse y mejorarse el ambiente ecológico: debe ocurrir un crecimiento de la fertilidad del suelo. Las aguas superficiales no deben contaminarse con compuestos químicos nocivos y otras sustancias químicas y biológicas que ingresan con las aguas de drenaje de los suelos bajo riego. No deben sobresaturarse e inundarse los territorios aledaños a las zonas de riego.

3.6. *Requerimientos a satisfacer por los sistemas de riego y drenaje*

Los sistemas de riego y drenaje deben asegurar la posibilidad de una producción agrícola intensiva y redituable. Además deberán conservar o mejorar las condiciones ecológicas. Debe aumentar la productividad de los suelos, las aguas superficiales no deberán contaminarse con sustancias químicas tóxicas, no deberán inundarse o subinundarse terrenos colindantes con las tierras de riego.

En el cuadro 2, se han sintetizado una serie de datos obtenidos de la literatura, los cuales se expresan en forma adimensional. Estos datos permiten comparar la actividad de desarrollo de los cultivos en los procesos del suelo en función de la humedad del mismo y de la profundidad del manto freático en los territorios drenados. Aquí se muestran también algunas características del desarrollo de los cultivos, como su productividad, profundidad de la zona radical (la cual influye en la productividad de la planta y con la cual está relacionada la cantidad de materia orgánica que anualmente se incorpora al suelo). Las características del suelo están representadas por el contenido de aire en el suelo, temperatura, intensidad de lixiviación de sustancias nutritivas (G/G_{max}); actividad microbiológica e intensidad de producción de nitrógeno por los microorganismos del suelo en forma amoniacal (NH_4), en forma nítrica (NO_3); intensidad de denitrificación (N), es

decir pérdida de nitrógeno al pasar a formas gaseosas, intensidad de la fijación de nitrógeno; es decir de la transformación del nitrógeno libre de la atmósfera en formas ligadas al suelo; cambio de la suma de formas móviles del nitrógeno ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$); cambio de los procesos de acumulación (+) y descomposición (-) del humus. Se representa el carácter de variación de la acidez de los suelos (pH) en función de los indicadores del régimen de humedad W y Δ . El número de invertebrados al igual que otras características que se muestran en este cuadro, es un indicador de la fertilidad del suelo.

En el cuadro se ha sombreado la región de valores óptimos de los factores. Analizando este cuadro se puede observar una cierta contradicción entre el desarrollo del cultivo y los procesos del suelo. De aquí surge la conclusión de que durante el mejoramiento de los suelos prácticamente no se pueden conjugar los requerimientos de los suelos, de las plantas, y de la conservación de la naturaleza con el manejo del régimen hídrico. La máxima productividad de la mayoría de las plantas tiene lugar cuando la humedad del suelo $W=W_{\text{opt}} \approx 0.75$ de la porosidad, y con una profundidad del nivel freático $\Delta \approx \Psi(W_{\text{opt}}) + z_r/2$, donde $\Psi(W_{\text{opt}})$, es la pérdida capilar con una humedad $W=W_{\text{opt}}$; z_r es la profundidad del horizonte activo radical (donde se localiza no menos del 85% de la masa de las raíces). En el cuadro 2, la humedad W y la profundidad del manto freático Δ , se muestran en magnitudes relativas: $\bar{W} = W/m$ y $\bar{\Delta} = \Delta/[\Psi(W_{\text{opt}}) + z_r/2]$. En la región de valores óptimos para la planta \bar{W} y $\bar{\Delta}$ tiene lugar una alta intensidad de denitrificación, se observa un balance negativo de humus y son relativamente altas las pérdidas de sustancias nutritivas que se lavan hacia los mantos freáticos. Por esta razón para obtener un alto rendimiento en los terrenos drenados y conservar un alto nivel de fertilidad de los suelos es indispensable que al proyectar los sistemas de drenaje se busquen las mejores combinaciones entre el régimen hídrico y sistema de medidas agrotécnicas, es decir, es indispensable ligar las medidas agrotécnicas (tipo y composición de cultivos, dosis de fertilizantes, labores culturales, etc.) con los parámetros del sistema de drenaje. Esto es posible solo cuando se puede pronosticar el rendimiento y los cambios de las propiedades de los suelos como consecuencia de los trabajos de drenaje.

Al drenar suelos inundables por lo general se elimina o disminuye la aportación de materiales en suspensión y sustancias orgánicas que traen las aguas de inundación. Esto también debe considerarse al construir un sistema de drenaje. En particular, si lo permiten las condiciones de la producción de la producción agrícola, es indispensable considerar la posibilidad de producir una inundación periódica de los territorios en periodos estrictamente limitados.

Cuadro 2. Comparación de las exigencias de las plantas, de los suelos y del medio ambiente en la regulación del régimen hídrico de los suelos bajo riego (las regiones sombreadas son valores óptimos).
Fuente: COLPOS, 1989.

		FACTORES	0.5 0.6 0.7 0.8 \bar{W}	0.0 0.5 1.0 1.5 $\bar{\Delta}$	
P L A N T A		Rendimiento de cultivos			
		Actividad de raíces			
S U E L O		Aereación			
		Salinidad			
		Lavado de nutrientes $\frac{G}{G}$			
	M I C R O O R G A N I S M O S		NH ₄		
			NO ₃		
			Denitrificación N ⁻		
			Fijación de nitrógeno N ⁺		
			NH ₄ + NO ₃		
			Humus		
		pH			
	Macroorganismos				
M E D I O A M B I E N T E		Sales removidas			
		Lámina de riego			

3.7. Necesidades de optimización del riego y de los parámetros de drenaje

El régimen de riego y los parámetros de drenaje también están interrelacionados. Es así que el régimen de riego depende de la profundidad y mineralización de las aguas freáticas. Por otro lado, para mantener al nivel freático a una profundidad determinada se construyen los sistemas de drenaje y los parámetros del mismo dependen del régimen de riego. Generalmente al proyectar los sistemas de riego, los parámetros de la red de drenaje se establecen después de definir el régimen de riego en forma independiente, lo cual hablando con rigor es incorrecto. Debe analizarse conjuntamente a los diferentes factores interactuantes de los sistemas de riego y drenaje.

La cantidad de lámina I_r , depende no solamente del contenido de sales en el suelo y de los requerimientos de humedad, sino también de la profundidad del manto freático (figura 10). Una alta lámina de riego I_r puede conducir a la degradación de suelos a su sobre-humedecimiento, ensalitramiento y a la posterior disminución de cosechas. La magnitud de la lámina de riego I_r depende fuertemente de los siguientes factores; 1) de los límites seleccionados para el rango de humedad del suelo W_{min} , W_{max} o en su defecto la humedad media; 2) de la profundidad del manto freático Δ (figura 10); 3) del contenido de sales de las aguas de riego (figura 11); 4) del ensalitramiento de los suelos y de las aguas freáticas.

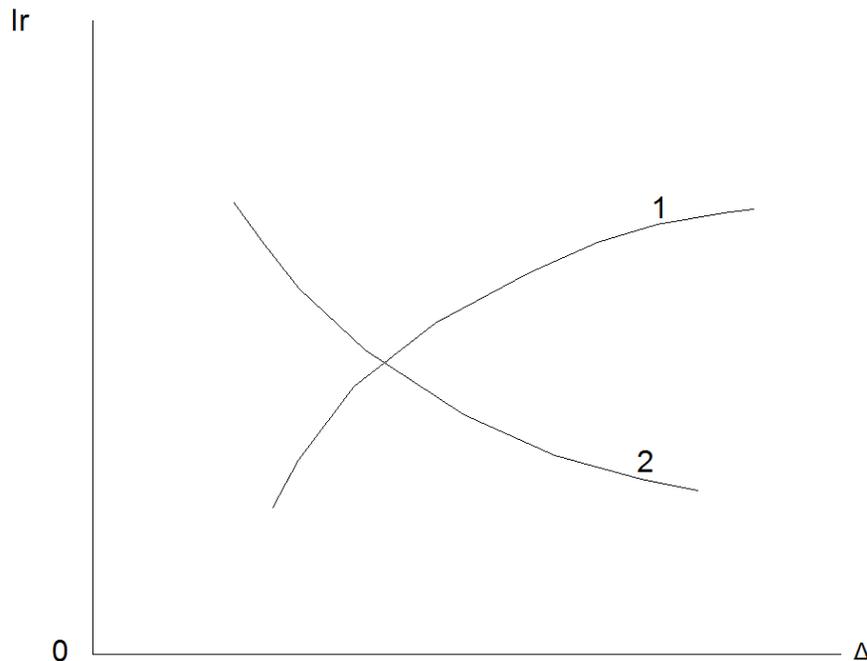


Figura 10. Gráfica esquemática de los cambios de la lámina de riego I_r en dependencia de la profundidad de los niveles freáticos Δ , mantenida con auxilio de un sistema de drenaje.

1. Es el caso cuando se lleva solamente un pronóstico del régimen hídrico del suelo sin considerar su régimen salino.
2. Es el caso cuando se lleva un pronóstico conjunto del régimen hídrico-salino de los suelos.

Fuente: COLPOS, 1989.

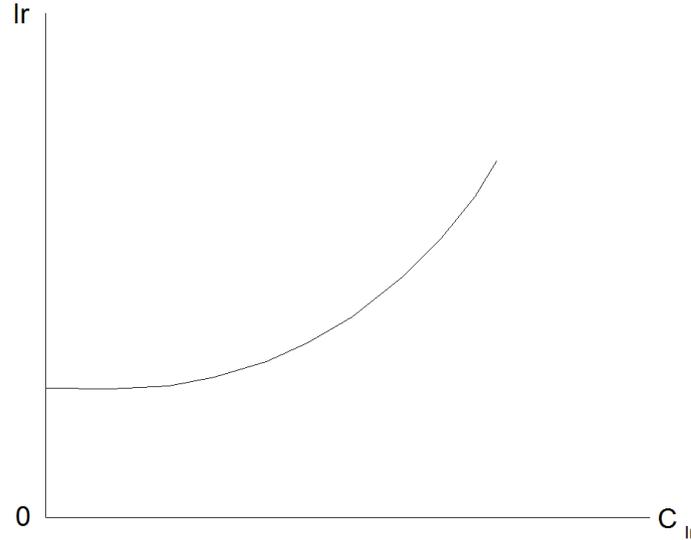


Figura 11. Gráfica esquemática de cambios de la lámina de riego I_r en dependencia de la mineralización del agua de riego C_{I_r} . (COLPOS, 1989).

El problema de optimización del régimen de riego y de los parámetros de drenaje es parte de la solución del problema, a continuación se describen los principales pasos para resolverlo:

- 1) En un principio debe resolverse el problema más general de asignación óptima de los recursos hidráulicos de una cuenca.
- 2) Después se resuelve el problema de la distribución óptima de los recursos hídricos en cada sistema de riego.
- 3) Tomando en cuenta las características dadas sobre la posible utilización de recursos hídricos por unidad de área y unidad de tiempo, se realiza la optimización del régimen de riego y de los parámetros de drenaje.
- 4) Si como resultado de los cálculos de optimización surge la posibilidad de economizar recursos hídricos, o si se establece la conveniencia de aumentar las láminas de riego, entonces puede realizarse un segundo ciclo de cálculos y optimización de la distribución del agua en el sistema de riego.

4. El riego y drenaje controlados

En el año 2015, en un artículo de Ayars y Evans, se presentó el estado del arte del drenaje agrícola. Se menciona que, estudios en áreas húmedas demostraron que es posible manejar drenes subterráneos para reducir el flujo de agua y almacenarla en el suelo para uso agrícola, además que el drenaje controlado ha sido también usado para la subirrigación en áreas húmedas. En este método, agua de buena calidad es bombeada dentro del sistema de drenaje para elevar el nivel freático para facilitar *in situ* el uso del agua por el cultivo. La subirrigación requiere un conjunto diferente de criterios para

facilitar la remoción rápida del agua en casos cuando la lluvia pueda interactuar con la subirrigación.

Similarmente al bombeo de agua dentro de los drenes, el riego por goteo subterráneo puede también ser usado temporalmente para elevar el nivel del agua subterránea a profundidades que el cultivo pueda usar. Estos sistemas han demostrado que ahorran agua. Ayars y Evans, presentan los siguientes ejemplos. Satanley y Clark, reportaron que el requerimiento de riego del tomate en el sur de florida se redujo de 33-40% con un sistema de riego por goteo subterráneo, en comparación al sistema convencional de subirrigación de zanjas abiertas, debido a que se reduce las tasas de escurrimiento. Smajstrla et al., reportaron que el rendimiento de la papa fue satisfactoriamente similar, pero se aplicó 33% menos de agua usando riego por goteo subterráneo para controlar el nivel del manto freático, comparado también, con el sistema convencional de subirrigación de zanja abierta. Esto resalta el cambio para incluir diseños de sistemas de irrigación y diseño y operación de sistemas de drenaje. Algunos investigadores han mostrado que los sistemas de drenaje subterráneo, relativamente superficiales y con espaciamentos cortos, pueden ser usados para incrementar la producción en áreas húmedas, controlando la profundidad del nivel freático para aportar agua a los cultivos en los periodos secos. Otra ventaja es que, algunos nutrientes lixiviados que se perdieron previamente, permanecen disponibles para los cultivos.

Con el manejo integral se tiene la necesidad de modificar la programación de riegos, para incorporar *in situ* el aporte de agua del manto freático al cultivo (Ayars y Hutmacher, 1994). En adición, al uso estacional de agua, se necesitarán desarrollar los coeficientes del cultivo y procedimientos de estimación para usar programas de riego que incluyan la contribución directa del manto freático y los efectos de la salinidad en la producción. Estos estudios serán necesarios para realizarse en un rango amplio de cultivos (Ayars y Evans, 2015).

En el año 2015, Shao *et al.*, reportaron el uso de un sistema experimental de drenaje y riego controlado para un cultivo de arroz, utilizando tanques de concreto de 2 metros de ancho, 2.5 de largo y 2 de alto (figura 12). Este dispositivo fue automatizado para la aplicación del riego y drenaje. Esta investigación se llevó a cabo en el sur de China en un clima subtropical, húmedo, con temperatura promedio anual de 15.3°C, lluvia de 1051 mm y evaporación de 900 mm.

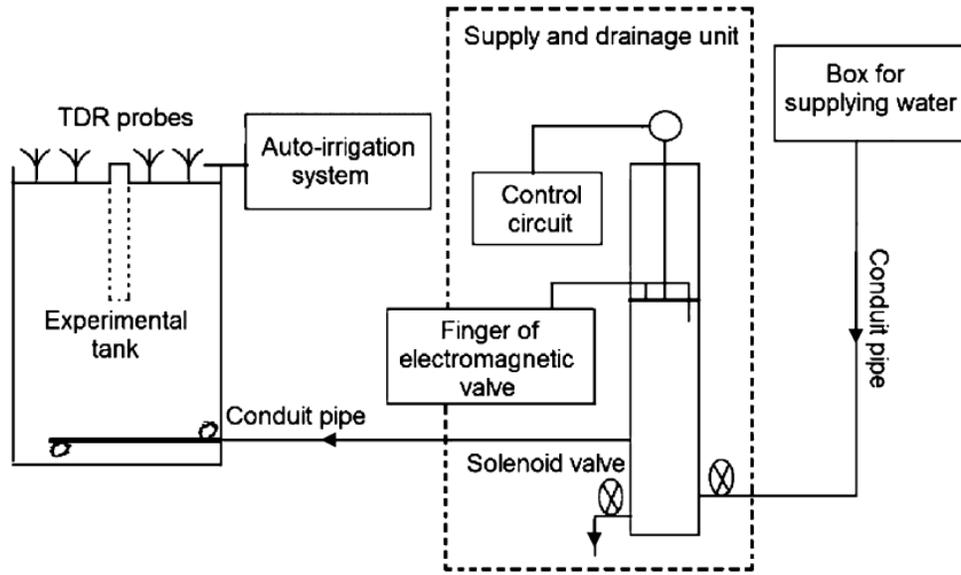


Figura 12. Diagrama esquemático del experimento

Se usaron cinco tratamientos (uno fue el tratamiento Control) para evaluar los efectos del riego y drenaje controlado, en cuatro etapas fenológicas del arroz, con respecto al rendimiento y características fisiológicas, en los años 2009 y 2010.

Como resultados obtuvieron que el sistema de riego y drenaje controlado (RDC) tiene un notable impacto en el alargamiento del brote y en la producción de masa seca del arroz. La altura de la planta en dos tratamientos con RDC, fueron significativamente más altas con respecto al tratamiento Control, en los dos años de estudio (figura 13).

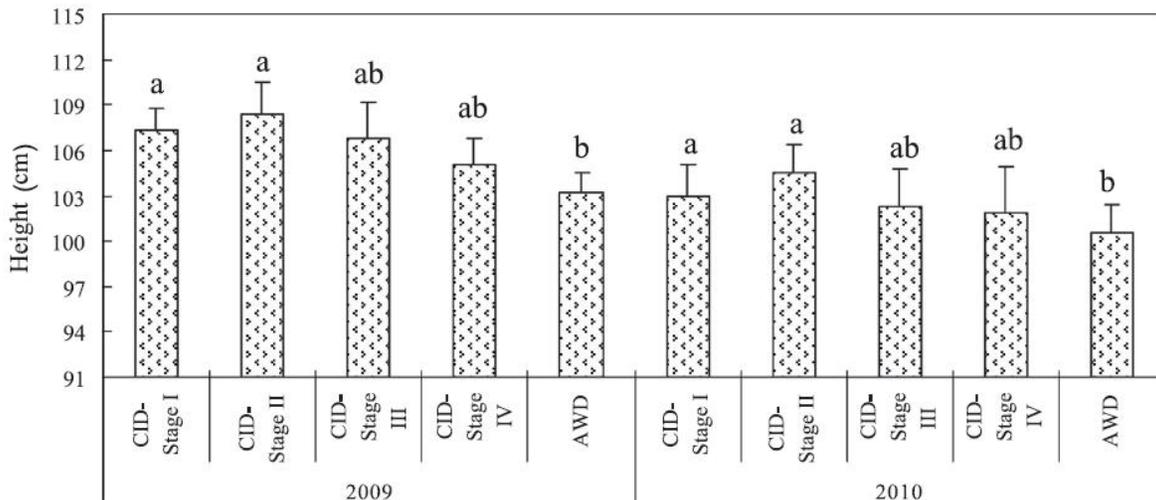


Figura 13. La influencia del riego y drenaje controlado en la altura del arroz en 2009 y 2010.

AWD indica humedecimiento y secado alternado. Los tratamientos de riego y drenaje controlado son CID-Fase I, CID-Fase II, CID-Fase III y CID-Fase IV. Fase I, Fase II, Fase III y Fase IV denotan las etapas de la fase de ahijamiento, estadio unión-arranque, etapa de iniciación de la panícula y la etapa lechosa, respectivamente. Los datos son promedios de las tres réplicas en la cosecha de 2009 y 2010. Las barras verticales representan \pm error estándar (SE) de la media. Esta se calculó a través de tres réplicas para cada año.

Los tratamientos con RDC tuvieron efecto significativo en la tasa de fotosíntesis en la hoja, la conductancia estomatal, la tasa transpirativa y la eficiencia en el uso del agua, en el arroz. Estos efectos se muestran en las siguientes gráficas. Se destaca el aumento de la tasa de fotosíntesis, transpiración, y conductancia estomatal, en los tratamientos con RDC I y II.

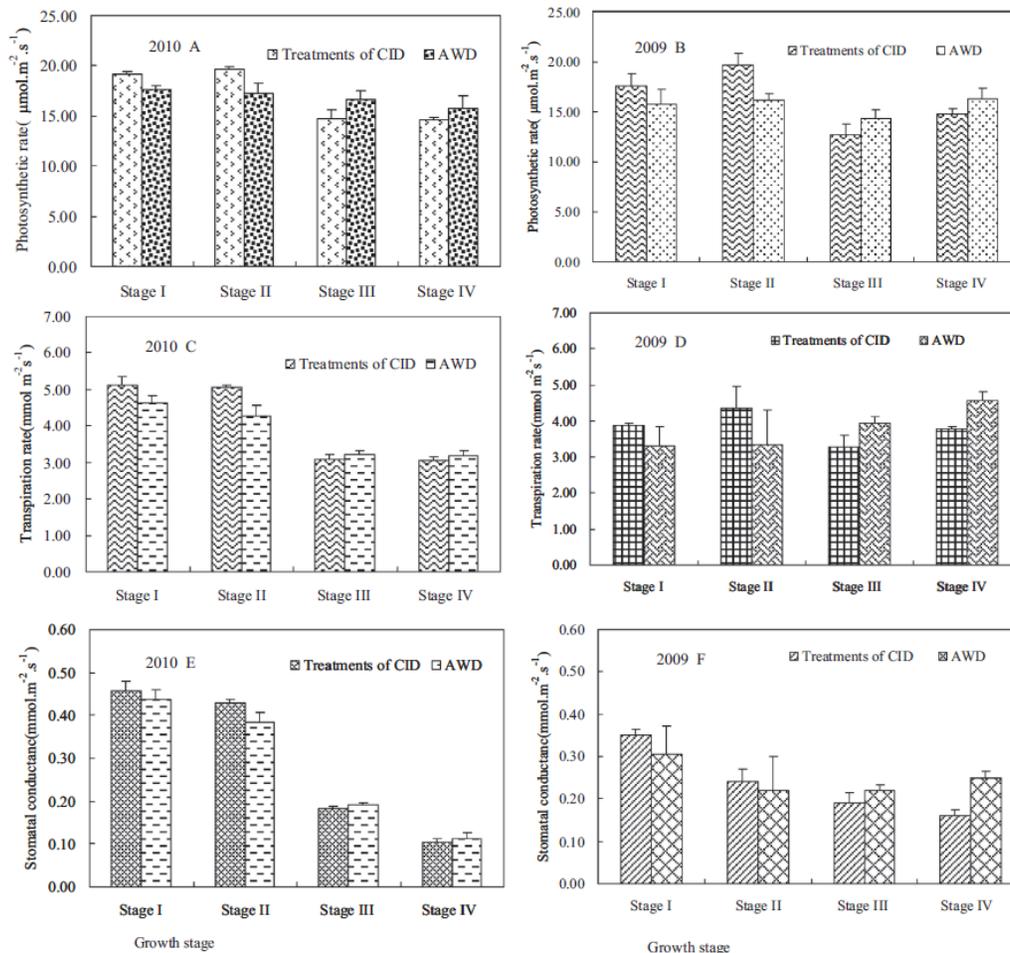


Figura 14. Respuesta de la tasa fotosintética (A y B), conductancia estomática (C y D), la tasa de transpiración (E y F), y el uso eficiente del agua de la hoja (G y H) en las diferentes etapas de arroz en 2009 y 2010.

Los datos son promedios de tres réplicas después de 7 días de estrés en el 2009 y 2010. Las barras verticales representan \pm error estándar (SE) de la media. El SE se calculó a través de seis repeticiones de cada año.

En cuanto a la productividad del agua de riego, está en el rango de 1.56 a 1.77 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, para los dos años. La productividad del agua de riego promedio del RDC-etapa II, para los dos años fue significativamente el más alto con respecto al control. Comparado con el tratamiento Control, el riego y drenaje controlado (RDC), mostró una reducción en el rendimiento de grano.

Una implicación importante del RDC es que existe un potencial considerable para incrementar la producción de arroz, a través de ajustes relativamente simples, pero profundos, en el manejo del tiempo de inundación debido a la lluvia. Por último, sugieren que la productividad del agua de riego puede ser administrado, considerando la puntualidad y la coincidencia del suministro de agua.

En tres años (1999-2001), Stanley (2004), realizó un estudio sobre el efecto que tiene el método de subirrigación (con zanjas o tuberías de microirrigación) y la profundidad del manto freático, en la producción de tomate en Florida, E.U.A, en áreas muy arenosas. El sistema de subirrigación, utilizado comúnmente, llamado irrigación de infiltración semicerrado, consiste en conducir el agua en tuberías desde el pozo hasta la parcela y en ella, aplicar el agua a través de zanjas, con la intención de elevar el nivel natural del manto freático a una profundidad cercana a 45 cm. Este método utiliza el movimiento capilar del agua hacia las camas de producción, para satisfacer el requerimiento de agua del cultivo. Debido a que el agua se aplica en periodos extensos, el uso de este sistema ha provocado que cantidades significativas de agua dejen las parcelas de producción como escurrimiento superficial. Este sistema no es comúnmente utilizado fuera de Florida, debido a las características del suelo que son requeridas para su uso: 1) el suelo debe ser muy arenoso, con alta permeabilidad, la cual es necesaria para una rápida adición o drenaje del agua; 2) un nivel freático alto o una capa impermeable en donde se pueda mantener un elevado nivel freático; y 3) disponibilidad de grandes cantidades de agua.

Stanley realizó este estudio para determinar: 1) el efecto del método de riego (subirrigación con zanjas y con tuberías de microirrigación) en la aplicación del agua y en el rendimiento del tomate, manteniendo la profundidad del nivel freático a 45 cm, y 2) el efecto de mantener el nivel freático a 45 y 60 cm, en el uso del agua y producción del tomate, con el sistema de subirrigación con tuberías de microirrigación (sistema completamente cerrado). En la figura 15, se ilustran los dos métodos de subirrigación. En ambos sistemas se utilizaron válvulas que controlaban las aplicaciones de agua, con el objetivo de controlar el nivel freático.

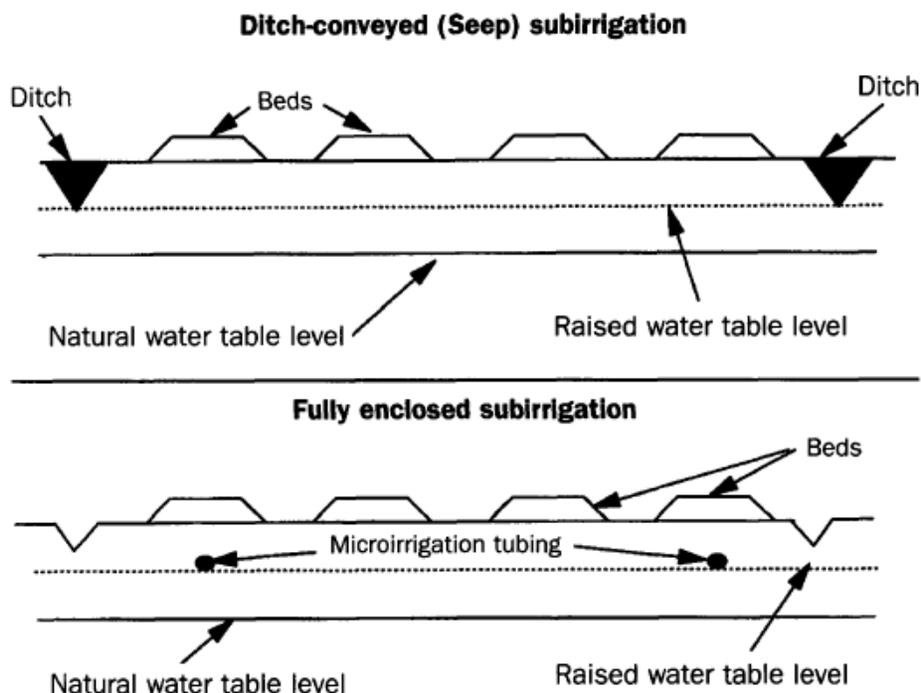


Figura 15. Diagrama de la sección transversal del sistema de subirrigación por medio de zanja (Seep) y del sistema de riego subterráneo totalmente cerrado (FES).

Se calculó la evapotranspiración potencial (PET), utilizando el método de Penman, modificado para las condiciones de Florida, con el suministro de información de una estación automatizada.

Los resultados obtenidos se ilustran en la figura 16. En esta se observa el agua acumulada para cada tratamiento, para cada año de estudio y la comparación con respecto a la evapotranspiración potencial. Estos datos muestran que el sistema de riego utilizado tuvo un gran impacto en la cantidad total de agua que se requiere para mantener la profundidad de 45 cm, del nivel freático. El tratamiento con zanjas (Seep) y manteniendo el nivel freático a 45 cm, utiliza 2 a 3 veces la cantidad de agua aplicada (dependiendo de la temporada) por el tratamiento con tubería de microirrigación (FES), manteniendo el nivel freático a 45 cm de profundidad. Entre temporadas, el ahorro promedio de aplicaciones, que utilizan el sistema subirrigación completamente cerrado (tubería de microirrigación) fue de 60 por ciento. Una diferencia consistente, ocurrió entre los tratamientos de FES-45 y FES-60, lo que indica que un nivel freático bajo, también conserva agua. Los ahorros de aplicación de agua resultantes de bajar el nivel freático a 60 cm (24 pulgadas) fue de un 37 por ciento.

Comparando los tratamientos y la evapotranspiración potencial (PET), se observa que el tratamiento FES-60 fue consistentemente más bajo o muy cercano a los valores de la evapotranspiración. El tratamiento FES-45 estuvo consistentemente por encima de PET para 1999 y 2000 (Figura 16a y 16b, respectivamente), en la última mitad de la temporada de 2001 estuvo muy cerca de la evaporación potencial (Figura 16c). El tratamiento Seep-

45 fue consistentemente 250 a 300 por ciento mayor que la PET, independientemente de la temporada. Debido a la naturaleza de este sistema, mucho de esto se puede atribuir a la escorrentía superficial.

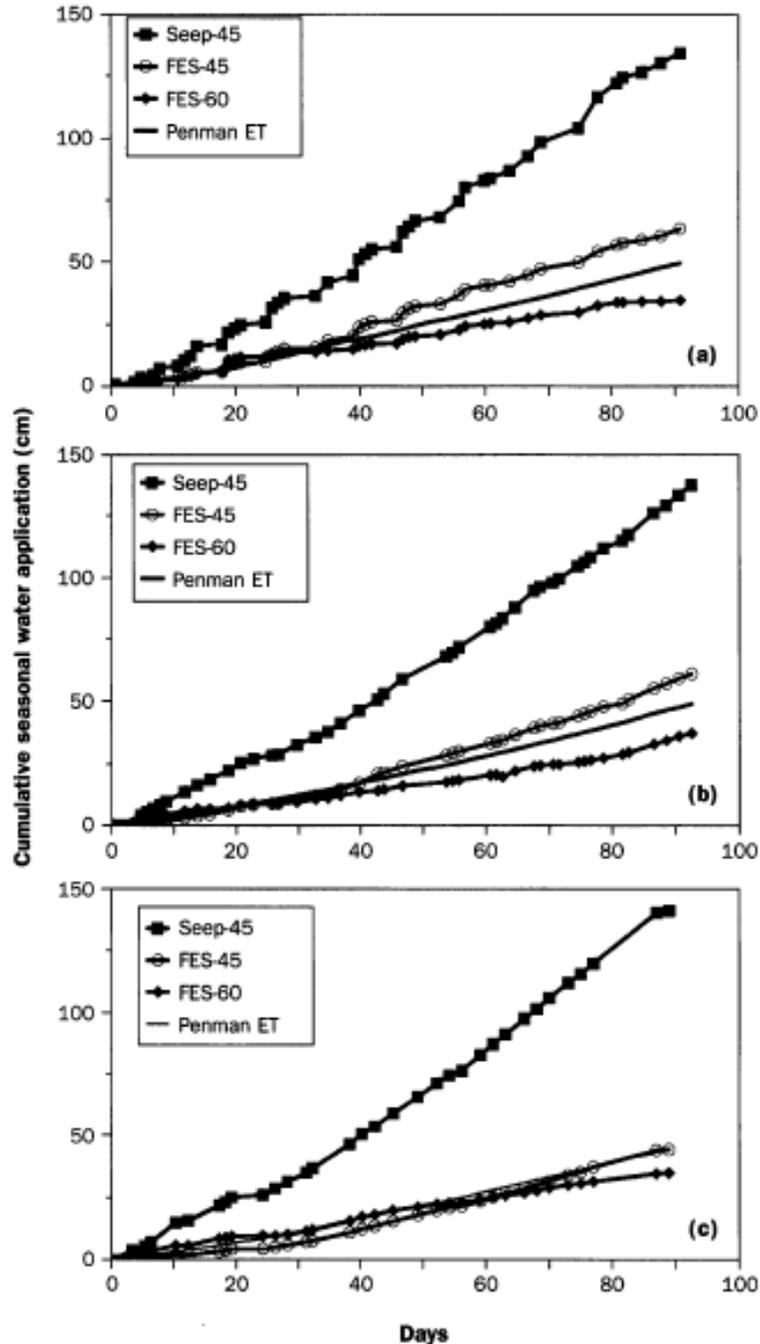


Figura 16. Aplicaciones estacionales de agua (acumulativos) para el tratamiento y ET (Penman) para los años 1999, 2000, y 2001 en las estaciones experimentales (a, b, y c, respectivamente).

Los resultados del tratamiento para las temporadas combinadas con respecto al rendimiento del fruto y calidad, se muestran en el cuadro 3. No se observaron diferencias estadísticas consistentes entre tratamientos para la mayoría de los componentes del rendimiento (con excepción de peso promedio del fruto) y no se tiene efecto perjudicial sobre el rendimiento, al utilizar el método de subirrigación totalmente cerrado.

Cuadro 3. Separación media estadística para los grados de tamaño de fruta de tomate y rendimiento.

Treatment	Tomato fruit size grade								Average fruit Wt (kg/ fruit)
	Extra large		Large		Medium		Total marketable		
	No. ha ⁻¹ (x 10 ³)	Fruit wt. (t ha ⁻¹)	No. ha ⁻¹ (x 10 ³)	Fruit wt. (t ha ⁻¹)	No. ha ⁻¹ (x 10 ³)	Fruit wt. (t ha ⁻¹)	No. ha ⁻¹ (x 10 ³)	Fruit wt. (t ha ⁻¹)	
Seep-45	251 a	48 ab	110 a	15 a	57 a	6 a	418 a	69 a	0.165 b
FES-45	225 a	44 b	111 a	15 a	60 a	6 a	395 a	66 a	0.167 b
FES-60	252 a	52 a	101 a	14 a	54 a	6 a	407 a	71 a	0.174 a

Se usaron técnicas de separación de promedios de Duncan, distintas letras asociadas a los promedios dentro de las columnas indican diferencias significativas entre los promedios ($p=0.05$). La misma letra asociada con promedios dentro de las columnas indica diferencias estadísticas entre los promedios ($p=0.05$).

En conclusión, el sistema de microirrigación con tuberías, utilizando estructuras para mantener el nivel freático a 45 cm de profundidad, ahorra un 60 por ciento de agua, sin sacrificar el rendimiento y calidad del fruto, comparado con el sistema que utiliza zanjas filtrantes para elevar el nivel freático.

Con el fin de demostrar los beneficios que se pueden obtener a partir del drenaje subterráneo, y para demostrar que la subirrigación se puede llevar a cabo, a través de un sistema de drenaje subterráneo existente, Sie-Tan y Driehuyzen (1987), realizaron un experimento de campo a gran escala, en la Columbia Británica (EUA).

El experimento consistió de cuatro regímenes de manejo del agua, como se muestra en la figura 17(b). Se eliminó el agua de los regímenes A, B y C durante los periodos de alta precipitación y baja evapotranspiración, por medio de drenes y el uso de una bomba.

Durante el verano, el agua se introdujo en el suelo en los regímenes B y C, por medio de drenes subterráneos, durante los períodos cuando se necesitaba riego. Los niveles de agua en la zanja fueron controlados con tomas de agua de desbordamiento (overflow standpipes) que se establecieron en un nivel apropiado para cada régimen. El régimen D fue una parcela de control, sin drenaje y sin subirrigación durante todo el experimento. Los cuatro regímenes de manejo del agua se pueden resumir de la siguiente manera:

Régimen A - Drenaje en todo momento; el nivel freático estaba controlado en o por debajo de los drenes subterráneos.

Régimen B - Drenaje en los períodos de precipitaciones altas y subirrigación a un nivel de 60 cm por debajo de la superficie del suelo durante los períodos de déficit hídrico.

Régimen C - Drenaje durante los períodos de precipitaciones altas y subirrigación a un nivel de 30 cm por debajo de la superficie del suelo durante los períodos de déficit hídrico.

Régimen D - Sin drenaje y subirrigación en cualquier momento.

Cuatro cultivos (maíz, papa, pasto y fresas) se plantaron en los cuatro regímenes de agua (ver figura 17) para determinar sus respuestas a cada régimen.

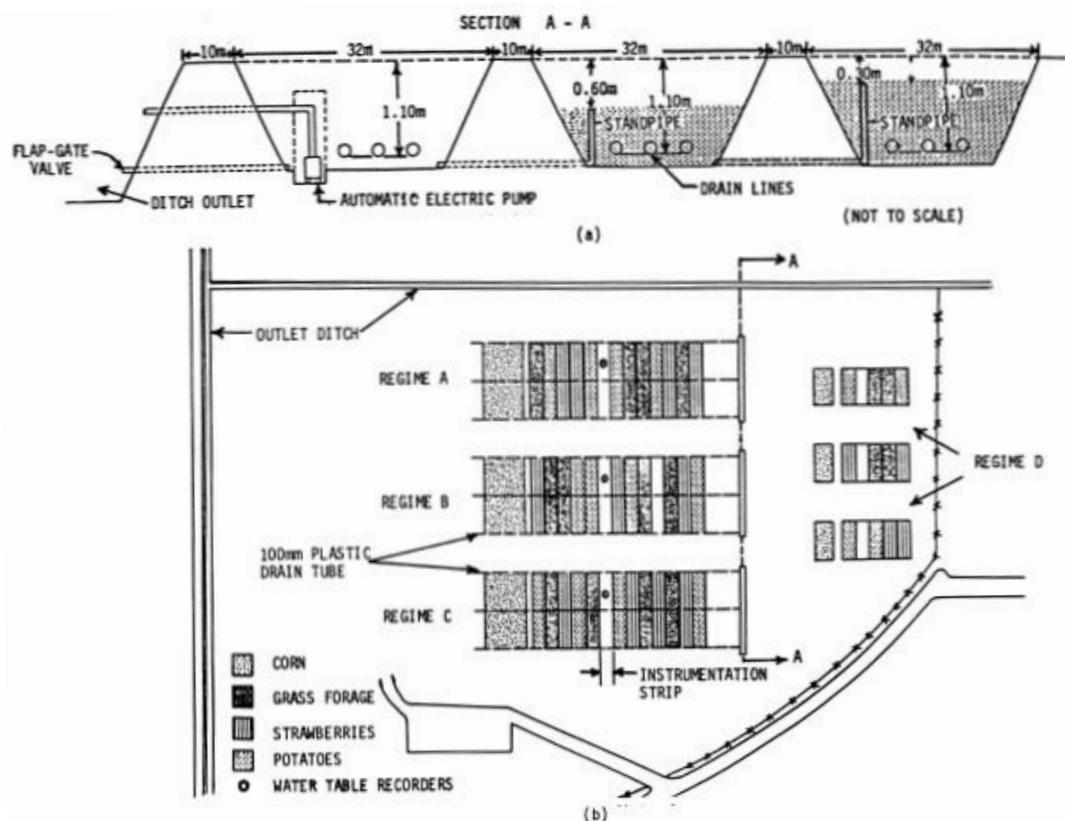


Figura 17. Diseño del experimento de campo

Se registraron continuamente la posición del nivel freático en el punto medio entre dos líneas de drenes para cada régimen. Las figuras 18, 19 y 20 proporcionan una comparación entre cuatro regímenes hídricos para 1984. El nivel freático en el régimen sin drenaje (D) se mantuvo en o cerca de la superficie del suelo, desde finales de otoño a principios de primavera. El área fue a menudo inundada durante los meses de invierno.

En los regímenes de drenaje (A, B y C), los ascensos (picos) en el nivel freático son evidentes. Estos picos corresponden a eventos de lluvias fuertes. Sin embargo, el exceso de agua de lluvia se drenó rápidamente y el nivel freático descendió en muy poco tiempo. La profundidad media del nivel freático en estos regímenes estuvo generalmente por debajo del nivel de 50 cm.

Un “día oportunidad” se definió en el estudio, como el día cuando nivel freático estaba a 50 cm o más abajo, de la superficie del suelo y el campo estaba trabajable. En 1983, 1984 y 1985 hubo 64, 86 y 60 más días de oportunidad, respectivamente, en el área drenada en comparación con la zona sin drenar.

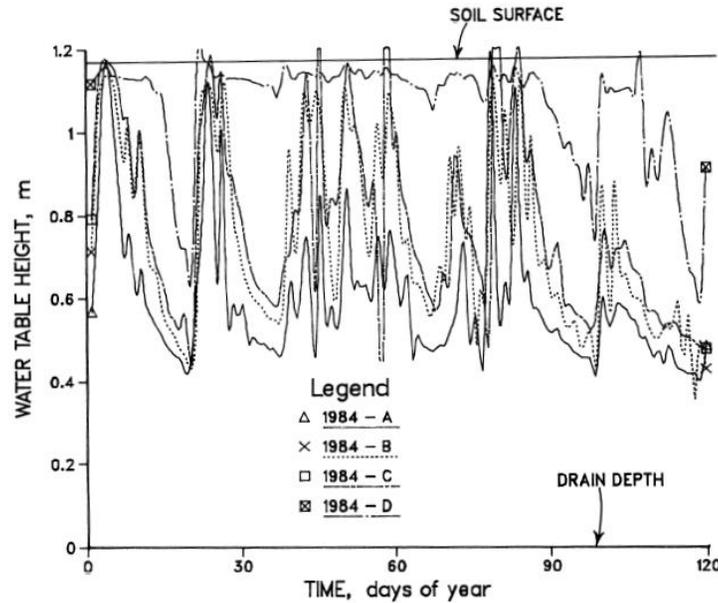


Figura 18. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de enero al 30 de abril de 1984.

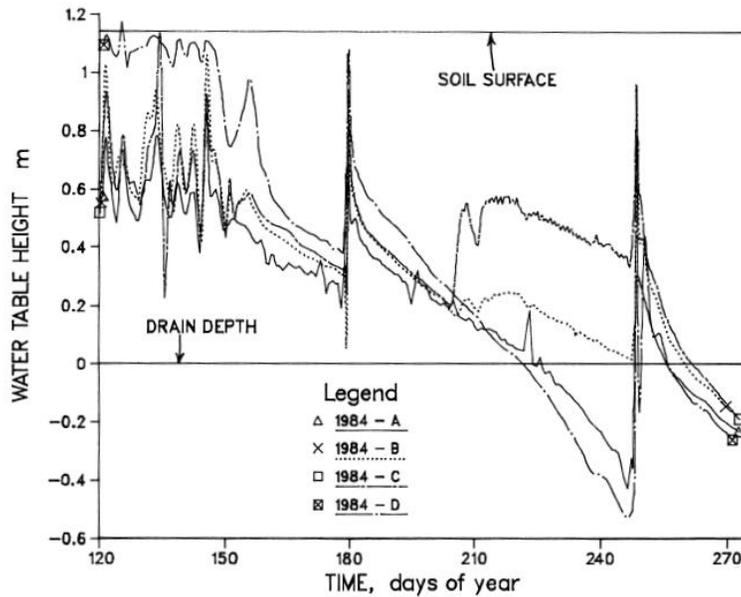


Figure 4. Water table height versus time for Regimes A, B, C and D, 1 May to 30 Sept. 1984.

Figura 19. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de mayo al 30 de septiembre de 1984.

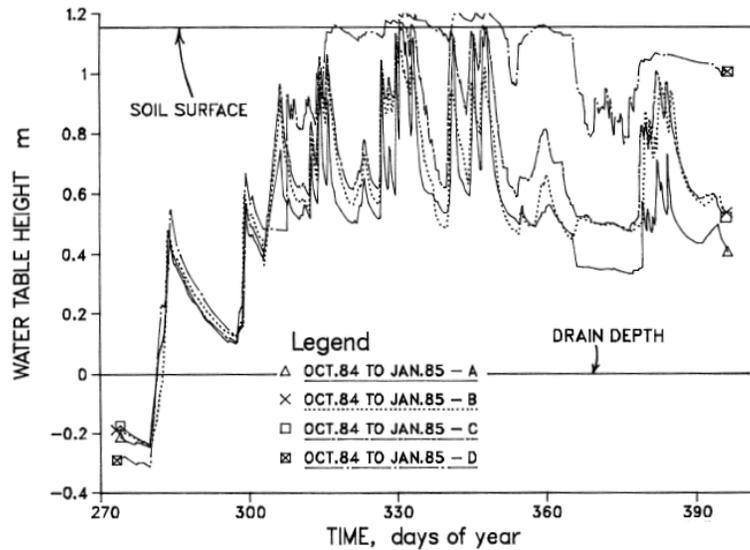


Figura 20. Altura del nivel freático vs tiempo, para los regímenes A, B, C y D, del 1 de octubre de 1984 al 31 de enero de 1985.

Los rendimientos de los cultivos de los regímenes con drenaje (A, B y C) son consistentemente más altos que los del régimen D, sin drenaje. En el caso de las papas, se registró un ligero descenso en el rendimiento.

Los resultados sugieren, en ausencia de cualquier riego, que el drenaje subterráneo incrementó los rendimientos del maíz, pasto y fresa en un 61, 38 y 725%, respectivamente. Sin embargo, disminuyó el rendimiento de la papa en un 10%.

En este estudio, se midió la respuesta del nivel freático con los regímenes de subirrigación (B y C) entre líneas de drenaje. Las figuras 18, 19 y 20 muestran la respuesta del nivel freático a la subirrigación durante los períodos de verano 1983, 1984 y 1985. La rápida respuesta del nivel freático sugiere que la subirrigación fue exitosa y puede llevarse a cabo mediante el uso del sistema de drenaje subterráneo existente. Este hallazgo indica la viabilidad potencial del uso de los sistemas de drenaje subterráneos existentes, para la subirrigación de campos agrícolas en el Valle del Bajo Fraser (Columbia Británica).

Los resultados muestran que la subirrigación tuvo poco efecto sobre el rendimiento de los cultivos, en el caso de la papa, el maíz y pasto, se encontró un ligero aumento en el rendimiento debido a la subirrigación. Cabe señalar que la subirrigación no tuvo ningún efecto sobre el rendimiento de la fresa porque las bayas fueron cosechadas antes de iniciar la subirrigación.

Smith et al., mencionan en un artículo elaborado en el año de 1985, que los sistemas de subirrigación son diseñados, para fijar el nivel el agua a una profundidad constante, con mínimos cambios en su posición que ocurren debido a la variación diurna de la evapotranspiración. Se establece la hipótesis que el escurrimiento y el exceso de drenaje

pueden ser minimizados si se controla el sistema, de tal manera, que el nivel del agua se le permita fluctuar dentro de límites establecidos. En tal sistema, el nivel freático puede decaer debido a la ET hasta alcanzar una profundidad que permita suministrar adecuadamente el agua a la zona de las raíces. En este punto debe iniciarse el bombeo, con el propósito de elevar el nivel freático hasta una máxima altura, la cual no debe interferir con el crecimiento del cultivo, entonces, el bombeo finalizaría y el ciclo empezaría de nuevo.

El propósito del artículo fue presentar los resultados del estudio de examinar la hipótesis presentada en el párrafo anterior. En un experimento de campo, cuatro sistemas de subirrigación con drenaje, fueron instalados en un solo campo para comparar los requerimientos de agua bajo diferentes métodos de control del nivel freático. Un segundo enfoque fue, desarrollar un modelo de simulación para describir las operaciones de un sistema de subirrigación y drenaje controlado. El modelo fue utilizado para predecir y comparar el uso del agua en la subirrigación bajo diferentes condiciones de operación usando datos históricos del clima.

Los sistemas fueron diseñados para permitir ensayar tres métodos de control para la subirrigación. El método de control A, es representativo de la forma en que los sistemas de riego subterráneo funcionan, es decir, el nivel de agua se mantiene constante por encima de la descarga. Durante los períodos de sequía, la posición de la capa freática varía ligeramente debido a las variaciones diurnas de la ET. El método B, tuvo mayor variación en la posición del nivel freático, que el método A. El control C permitió una mayor variación en la posición del nivel freático que los otros. Se previó que esta variación permita una mayor capacidad de almacenamiento y la utilización de las precipitaciones, disminuyendo así las necesidades de riego.

La figura 21 muestra los resultados para un sistema operado bajo el método de control A. La variación en el nivel de agua del tanque de carga, era lo más cercano a una condición de carga constante, utilizando bombas e interruptores. La gráfica del nivel freático muestra que durante los períodos secos (días 200 a 205 y 216 a 220) el sistema de subirrigación fue capaz de mantener el nivel freático a una profundidad relativamente constante. Los valores acumulativos del riego, precipitaciones y drenaje, también se presentan en la figura 21. El nivel freático relativamente alto, mantenido por este método de control, causó el drenaje del exceso de agua después de algunos eventos de lluvia.

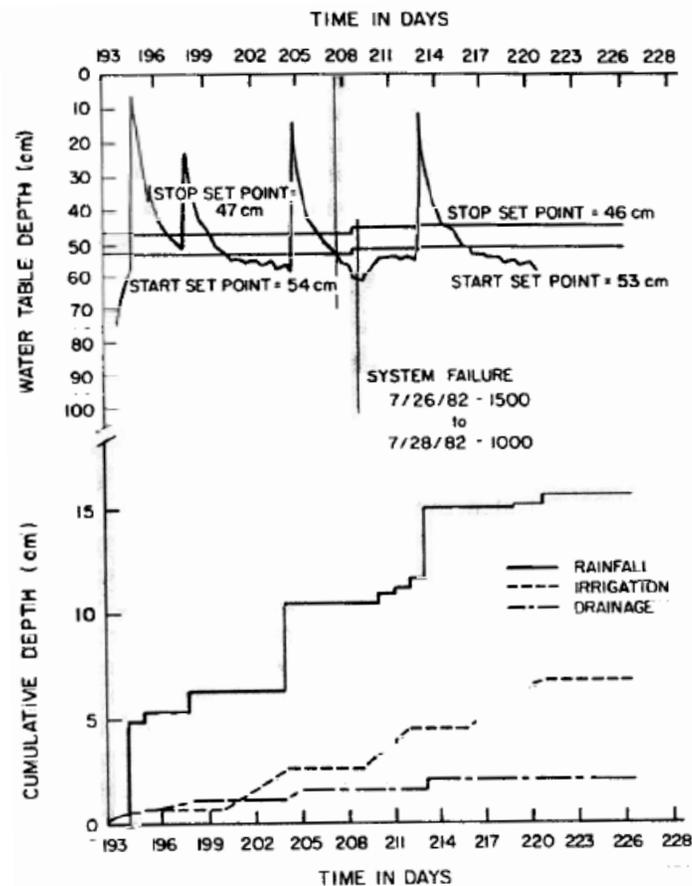


Figura 21. Profundidad del nivel freático en el punto medio y profundidades acumuladas de lluvia, riego y drenaje para el sistema experimental 1, que opera bajo el método de control A.

La figura 22 muestra los resultados obtenidos con el método de control C. Cuando la profundidad del nivel freático, en el punto medio entre drenes, excedió los 85 cm, la bomba se inició y el nivel del agua en el tanque se fijó a 50 cm por encima de los drenes. La bomba se detuvo cuando el nivel freático, en el punto medio, llegó a 60 cm de la superficie del suelo. Durante el período indicado, el nivel freático descendió lo suficiente para arrancar la bomba sólo una vez (día 193). La lluvia fue suficiente para mantener el nivel freático más alto que la profundidad de 85 cm para el resto del período. Durante los períodos de sequía, la profundidad del nivel freático constantemente aumentó. Por casualidad, ocurrieron eventos de lluvias justo antes de llegar a la profundidad del nivel freático, a la cual se inicia el bombeo. Dado que el nivel freático tenía un nivel bajo cuando ocurrieron los eventos de lluvia, la mayor parte de la lluvia se almacenó en el perfil del suelo por debajo de la zona de las raíces y el drenaje del sistema fue insignificante. Los datos presentados para los dos sistemas muestran que el método de control tuvo una gran influencia en la cantidad de agua aplicada. El método de control A requirió 6.9 cm de riego durante el periodo de 33 días analizados, mientras que el método C requiere sólo 2.1 cm de riego. Un total de 1.9 cm de exceso de agua se drenó en el método A, mientras que en el método C, la cantidad fue insignificante.

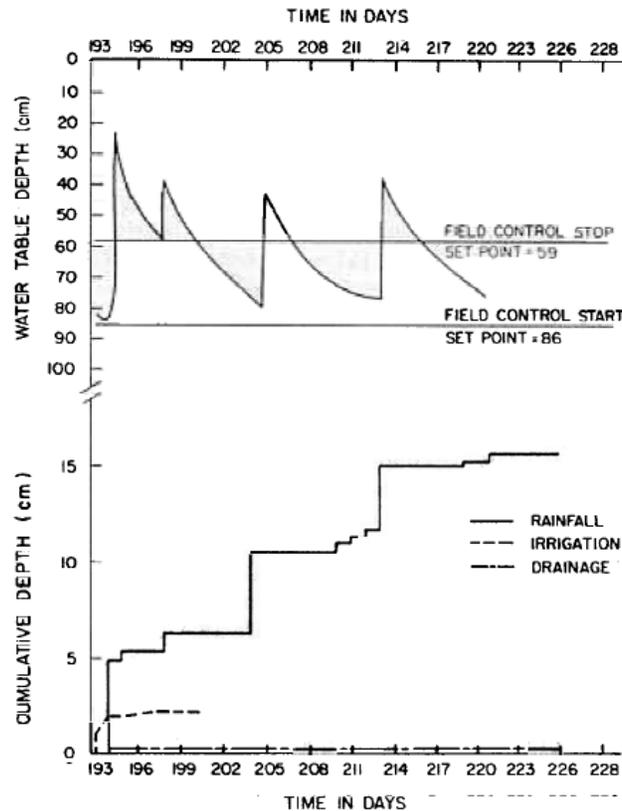


Figura 22. Profundidad del nivel freático en el punto medio y profundidades acumuladas de lluvia, riego y drenaje para el sistema experimental 2, que opera bajo el método de control C.

La solución a la ecuación de Boussinesq para el movimiento del agua en condiciones de riego subterráneo y drenaje, se utilizó para modelar el rendimiento del sistema durante varias temporadas del cultivo. El modelo evaluó la posición del nivel freático, junto con el drenaje, el riego, y los volúmenes de escorrentía, en varias temporadas de cultivo para el maíz. El modelo se utilizó para determinar los requerimientos de riego por medio de la subirrigación bajo diferentes métodos de control.

Los resultados del primer año a partir de los experimentos de campo indican que los requerimientos de riego se pueden reducir mediante el control del sistema, permitiendo que la profundidad del nivel freático, en el punto medio, pueda fluctuar dentro de ciertos límites.

Varias simulaciones se llevaron a cabo para cada método de control para optimizar los puntos de ajuste para iniciar y detener la subirrigación, para el método dado. Las simulaciones predijeron una disminución del requerimiento de riego, cuando la profundidad del punto medio, del nivel freático se dejó fluctuar. El requerimiento de riego se redujo en promedio 6.7%, en comparación con el método de control constante del nivel de agua, durante cinco años de simulaciones.

Los resultados presentados en este trabajo indican que hay un buen potencial para la reducción de las necesidades de riego, mediante la subirrigación, usando un sistema con un control simple, el cual emplea un interruptor de flotación, activado por el nivel freático en el campo. Una ligera modificación en la forma en que los sistemas de riego subterráneo se controlan actualmente, puede resultar en una disminución de consumo de agua.

Doty y Parsons (1979), publicaron los resultados de un experimento, que tuvo como objetivo mostrar que un “montículo de agua”, puede construirse con el fin de controlar la carga sobre la salida de un dren. En este trabajo se presentó la forma aproximada del montículo, en tres espaciamientos de la tubería, los requerimientos de agua y carga, y la respuesta del rendimiento a las profundidades y espaciamientos. Se diseñó, instrumentó y operó un sistema de drenaje controlado y reversible (CaRDS), durante 2 años (1975 y 1976). El sistema se construyó con siete tuberías perforadas de 8 cm de diámetro de PVC corrugado, instaladas a 8, 16, y 32 m de espaciamiento, las cuales descargaban a un colector de 20 cm. Este colector se conectó a un tanque de carga constante, con el cual se controló la cantidad de agua que entraba o salía de la parcela, mediante un vertedor. En 1975, el vertedor fue bajado al nivel de las líneas de drenaje (no hubo control en la descarga), y en 1976, no se permitió el drenaje (existió control en la descarga) (Figura 23). La lluvia, la evaporación del tanque y las fluctuaciones del nivel freático, fueron medidas y registradas durante el experimento, así como los rendimientos.

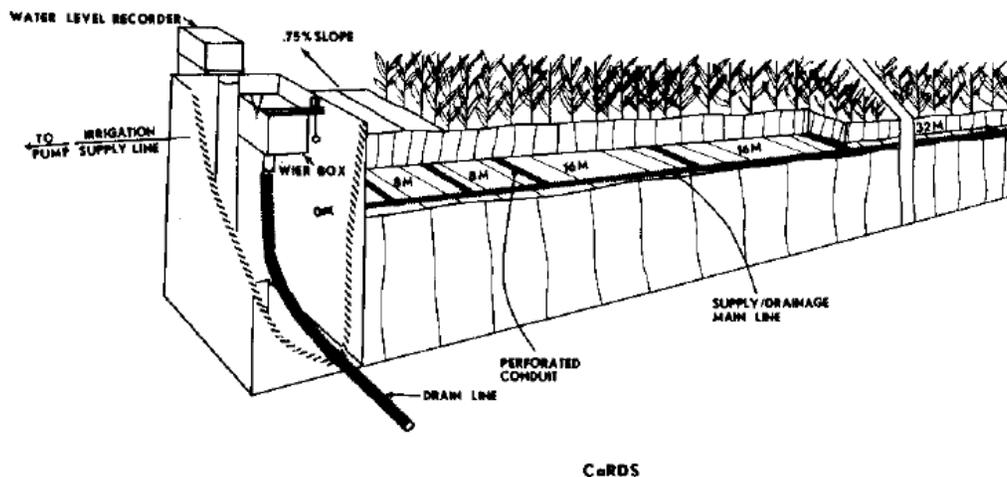


Figura 23. Esquema del sistema de drenaje controlado y reversible

Como resultado se reporta que con el sistema CaRD, se pudo construir un montículo de agua sobre las tuberías de drenaje en un suelo franco arcillo arenoso. El montículo varió y no se mantuvo en el nivel deseado, probablemente debido por las restricciones de flujo, la baja conductividad hidráulica de los suelos, o alguna restricción del sistema, como resultado, el agua bombeada en el sistema no fue suficiente para mantener el montículo de agua en la elevación deseada, por encima de las tuberías de drenaje. El montículo varió conforme el nivel natural del manto freático, como se observa en la figura 24 y 25.

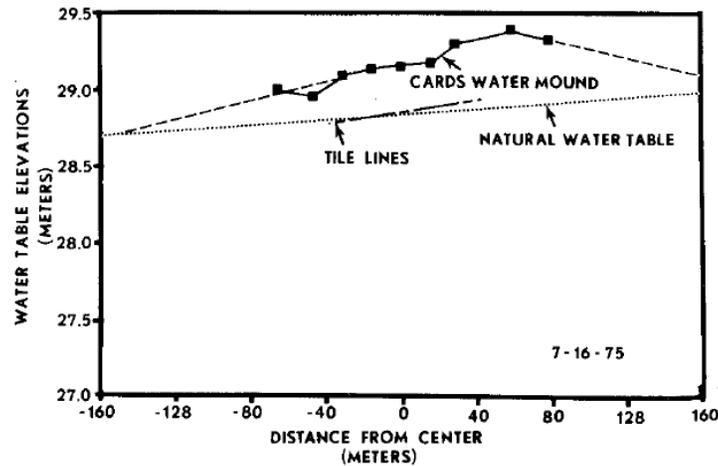


Figura 24. Montículo de agua - una sección transversal a través del centro de la parcela en paralelo a las líneas de drenaje, del 16 de julio de 1975.

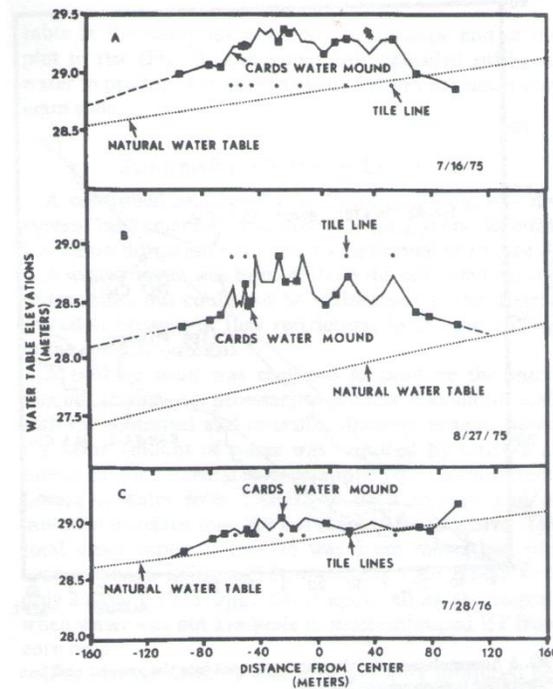


Figura 25. Montículo de agua - una sección transversal a través del centro de la parcela en paralelo a las líneas de drenaje.

- A. Nivel freático natural, cerca de las líneas de drenaje
- B. Después de 35 días sin lluvia
- C. Después de un periodo intenso de lluvia en 1976

Concluyeron que es necesario el drenaje, para la obtención de máximos rendimientos con el sistema de drenaje controlado y reversible. Aproximadamente la misma cantidad de agua fue requerida por el CaRDS que la estimada para un sistema superficial de riego. Las pérdidas de agua del CaRDS por percolación profunda y/o flujo subsuperficial lateral

no fueron excesivas. El agua total ingresada al sistema fue 5 cm más que la evaporación del tanque en 1975 y 22 cm más que la del año de 1976.

Los más altos rendimientos (en dos años) se presentaron entre líneas de drenaje con separación de 32 metros en ambos suelos (franco arcillo arenoso y franco arenoso), sin embargo, las diferencias en los rendimientos para las separaciones de 8, 16 y 32 metros, fueron significativas solamente en el nivel del 85 por ciento.

En general, las características de las áreas que indican que el drenaje subterráneo y/o subirrigación puede ser beneficioso y viable son:

- (1) Distribución desigual de la precipitación durante el año, lo que provoca el exceso de agua en el campo.
- (2) Niveles freáticos que son generalmente altos en las estaciones húmedas.
- (3) La tierra es relativamente plana
- (4) Una gran cantidad de agua de alta calidad disponible para la subirrigación.

Actualmente, la subirrigación, mediante el sistema de drenaje subterráneo existente, está recibiendo cada vez más atención debido a las siguientes ventajas:

- (1) Los costos de mantenimiento son mínimos para un sistema de drenaje subterráneo bien diseñada para realizar la doble función de drenaje y subirrigación.
- (2) Cuando se utiliza un sistema de drenaje subterráneo existente para subirrigación no se requiere ningún sistema de riego adicional.
- (3) La pérdida por evaporación del agua desde la superficie del suelo es mínima. Este es uno de los grandes atractivos para las áreas donde la evaporación es alta.
- (4) La compactación del suelo y la lixiviación de los nutrientes de la zona radicular superior se pueden reducir.

5. Contribución del agua subterránea superficial al uso consuntivo de los cultivos

El agua subterránea superficial es un recurso que es ignorado cuando se consideran las alternativas del manejo del agua en el riego agrícola. Incluso aunque ésta tiene el potencial de proveer cantidades significativas de agua para el uso del cultivo, bajo condiciones de manejo apropiadas (Ayars et al., 2006). El uso del agua subterránea *in situ* por los cultivos, es un sistema más complicado que la aplicación de uno superficial, porque existe información limitada sobre el potencial de uso del agua subterránea

superficial por parte del cultivo debido a que es muy difícil medirla (Ayars y Evans, 2015). Incluso aunque han existido investigaciones que describen el uso *in situ* del agua subterránea superficial por los cultivos de una amplia variedad de cultivos en los últimos 50 años, el potencial total de este recurso no ha sido cuantificado (Ayars et al., 2006).

El requerimiento de agua de los cultivos ha cambiado con los años, con nuevas variedades de plantas (tolerantes a la sequía, por ejemplo) y con las nuevas estrategias del manejo del riego. En adición, existen mejores métodos para calcular el requerimiento de agua de los cultivos. Este componente del diseño puede ser transitorio si la fuente del agua subterránea superficial es la sobre-irrigación, pero puede llegar a ser cada vez más una parte importante del balance de agua y prolongar los intervalos de riego para conservar el agua y nutrientes con un manejo apropiado, si la fuente de agua subterránea superficial, es externa al sitio. Entonces el uso *in situ* por el cultivo es una alternativa. Las fuentes del agua subterránea superficial en cada sitio deben identificarse y cuantificarse como parte de las investigaciones de campo y del diseño del sistema de drenaje. En suma, los valores del uso del agua del cultivo, pueden cambiar con nuevas variedades desarrolladas, que son más tolerantes al estrés por calor, sequía, y salinidad del suelo (Ayars y Evans, 2015).

La revisión demuestra que para que el uso *in situ* sea factible debe de existir agua subterránea de buena calidad, con relación a la tolerancia a la sal del cultivo y que esté disponible por un periodo extenso de tiempo. Investigaciones han demostrado un significativo potencial para usar *in situ* el agua subterránea superficial por una variedad de cultivos y en condiciones, con un amplio rango de conductividad eléctrica y profundidad del agua subterránea superficial (Ayars et al., 2006).

Se ha reconocido durante algún tiempo que el drenaje subterráneo no debería remover el agua que puede contribuir al crecimiento del cultivo, más allá del punto necesario para establecer una adecuada aireación. Estudios han demostrado que el uso *in situ* del agua tiene un efecto significativo en el espaciamiento lateral. Incorporando el uso del agua subterránea se reduce el flujo total hacia los drenes, lo cual resulta en un más amplio espaciamiento entre drenes para el punto medio de la posición del nivel freático, sin tener que incrementar la profundidad lateral (Ayars y Evans, 2015).

Así la profundidad de la instalación puede variar como parte del proceso del diseño para determinar el efecto de la calidad del agua, si este es un criterio. Una estrategia alternativa con respecto a la profundidad de los drenes, es el control del nivel freático usando estructuras en la salida del dren. Esto reduce la profundidad de las líneas de flujo dentro del perfil del suelo y reduce la carga de sales. Estudios encontraron que una colocación profunda del dren, resulta en excesivas pérdida de agua (sobredrenaje) y usando una colocación superficial, se ahorra agua de riego. Otros estudios han demostrado que el manejo del nivel del agua subterránea, proporciona beneficios significativos en la reducción de los costos de energía y de la conservación del agua (Ayars y Evans, 2015)

Algunos diseños han incluido drenes bi-nivel, con un patrón tanto profundos como superficiales (en la colocación de los drenes laterales). Estos diseños pueden aplicarse en áreas para proveer beneficios que mejoren el manejo del nivel freático, si en el diseño se incluye un control en la salida del dren. El espaciamiento variable puede también ser acoplado con la instalación bi-nivel para proveer adicionales oportunidades de manejo (Ayars y Evans, 2015).

En el artículo presentado por Ayars et. al. (2006), se hace una revisión completa del uso *in-situ* del agua subterránea superficial en el riego agrícola. Se menciona que el principal método para estimar el uso de agua subterránea superficial por los cultivos han sido mediciones directas con lisímetros de pesada y de drenaje o calculándolo como un término residual, usando una ecuación de balance de masa. Cada uno de estos métodos tiene problemas y errores. El costo de la construcción, operación, y mantenimiento del lisímetro de pesada, es la mayor limitante de esta técnica. El uso de una ecuación de balance de masa requiere calcular el uso del cultivo del agua subterránea superficial como un residual, basado en la medición de la evapotranspiración, percolación profunda, escurrimiento superficial, agua aplicada, y cambio en el almacenamiento de agua del suelo. Cada uno de estos componentes está sujeto a errores en la medición que afectan el resultado final. La mayor fuente de error es probablemente la evapotranspiración, porque usualmente los trabajadores no toman mediciones directas de este componente y este cálculo es usualmente hecho en base a mediciones del clima.

En dicho artículo se presentan en detalle los factores que afectan el uso del agua subterránea superficial por los cultivos. En los siguientes párrafos se explican los factores principales.

5.1. Flujo de agua en el suelo

El flujo de agua en el suelo es con frecuencia calculado en una dimensión usando la Ley de Darcy como se muestra en la ecuación 1.

$$z = \int_0^{hz} \frac{dh}{1+q/k(h)} \quad (1)$$

donde z es la distancia entre nivel freático y una posición en el perfil del suelo con un flujo constante q , la conductividad hidráulica (k) se da como función del potencial mátrico (h).

Ayars et al. (2006), mencionan que se ha modelado el uso de los cultivos del agua subterránea superficial, con un modelo empírico desarrollado por W.S. Meyer, que trata de capturar la interacción del contenido de agua del suelo, desarrollo de las raíces, requerimiento de agua del cultivo, y tipo de suelo. La ecuación utilizada es:

$$q_u = \frac{a}{e^{b(Z_R/Z_{max})(1+e^{C/(x+0.01)})}} \times ET \quad (2)$$

donde q_u es el flujo ascendente (mm/día), a , b , c son coeficientes de regresión, Z_R es la profundidad de 1/3 de la profundidad de la zona de la raíz desde el nivel del agua del suelo (m), Z_{max} es el límite del nivel freático por debajo del cual el flujo ascendente sería menos de 1 mm/día tal como se define por Talsma (m), y x es el contenido relativo de agua que se describe por la relación:

$$x = \frac{\theta_s - \theta_{avg}}{\theta_s - \theta_1} \quad (3)$$

donde θ_s es el contenido de agua a saturación, θ_1 es el límite inferior de disponibilidad de agua para la planta, y θ_{avg} es el contenido medio de agua de la capa no saturada.

Otra ecuación empleada, es la simplificación de la ley de Darcy (Ec. 1) y resuelta analíticamente usando una función de forma exponencial para la conductividad hidráulica para los suelos estudiados. El máximo flujo en estado estacionario es.

$$q_m = Ae^{-bz} \quad (4)$$

donde q_m es el flujo, y A y B son coeficientes de regresión relacionados con las propiedades del suelo, y z es la profundidad del nivel freático. El uso de la expresión da una indicación del potencial de uso de agua de los cultivos para las condiciones dadas.

Otra ecuación utilizada para cuantificar flujo ascendente es

$$q_u = aD^b \quad (5)$$

donde q_u es el flujo que asciende desde el manto freático con profundidad D y a y b son constantes empíricas que dependen de los parámetros hidráulicos del suelo. Los valores para a son específicos para el suelo de interés, donde b representa al tipo de suelo.

Otras investigaciones han indicado que el flujo ascendente desde el manto freático puede representarse adecuadamente por:

$$q_u = a - bD \quad (6)$$

Al igual que en la Ec. 5 los valores para a son muy variables, mientras que los valores para b sólo dependen del tipo de suelo. Se demostró la aplicación de esta ecuación, para el uso de las aguas subterráneas poco profundas, de un cultivo de algodón, en tres tipos de suelo diferentes. Las ecuaciones de regresión para el uso de las aguas subterráneas poco profundas, para el algodón, y para diferentes suelos se muestran en la figura 26. Los datos demuestran que para una profundidad dada al nivel freático, el porcentaje de agua extraído del manto freático se reduce a medida que aumenta el contenido de arcilla del suelo. Esto es una consecuencia de una reducción de la conductividad hidráulica no saturada en el suelo de textura más fina. Los datos también muestran que para un tipo

de suelo dado, un aumento en la profundidad del nivel freático, resulta en una reducción del uso de agua del cultivo desde el manto freático, como se predijo en la ecuación. 1.

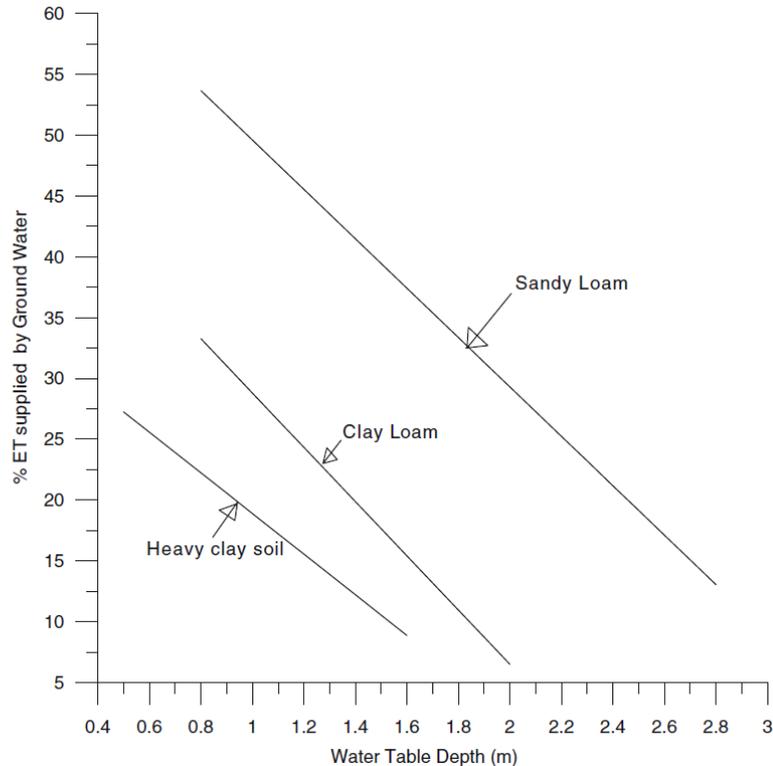


Figura 26. Efecto del nivel freático y textura del suelo en la evapotranspiración del agua subterránea poco profunda para el algodón (Grismer y Gates 1988)

Fuente: Ayars et al. (2006)

5.2. Raíces

El desarrollo de un modelo y de su potencial, que den una mejor comprensión del uso del agua subterránea superficial de los cultivos, debe describan el sistema de raíces y su interacción con el agua subterránea. El uso del agua subterránea de los cultivos no será significativo hasta que la zona de desarrollo de la raíz se encuentre próxima al manto freático y exista un gradiente adecuado para inducir el flujo hacia el sistema de raíces. El tipo de suelo determinará la posición deseada de la zona de las raíces en relación con el nivel freático, para permitir un uso significativo del agua subterránea por parte del cultivo.

La presión de entrada de aire determina el punto en el que el suelo está casi saturado y capaz de suministrar agua a tasas que son casi iguales a la conductividad hidráulica a saturación.

Borg y Grimes (citados por Arars et al.) desarrollaron una ecuación que describe el desarrollo de las raíces como una función del periodo de crecimiento total, de los días a

la profundidad máxima de enraizamiento, y de los días después de la siembra. La ecuación es:

$$RD = RM_m[0.5 + 0.5 \times \sin(3.0 \times (DAP/DTM) - 1.47)] \quad (7)$$

donde RD es la profundidad de la raíz, RM_m es máxima profundidad de las raíces, DAP es días después de la siembra, y el DTM es el día en el que se tiene la máxima profundidad de enraizamiento.

También existe la cuestión de la porción de la zona de la raíz que es más eficaz en la extracción de agua. La ecuación de Meyer sugiere que la parte más significativa de la zona de la raíz es la tercera parte superior que generalmente es la zona de máxima densidad de raíces. Otra investigación, (Reicosky *et al.*) demostró que la mayoría del agua que utilizó un cultivo de soja, en presencia de agua subterránea poco profunda, extrajo el agua de la pequeña porción de la zona de la raíz cercana a la franja capilar. Esto apoya la idea de que el máximo potencial se alcanzará cuando las raíces están cerca del nivel freático. Soppe y Ayars, demostraron con una cosecha de cártamo que casi el 40% del uso de agua del cultivo se obtuvo de la parte inferior de la zona radicular durante los períodos de máxima demanda.

5.3. Cultivos

Las características de la planta que afectan a la contribución potencial de las aguas subterráneas, a las necesidades de agua de los cultivos, incluyen tolerancia a la sal, duración de la temporada de crecimiento, y las características de enraizamiento.

La tolerancia a la sal de la planta es un factor dominante que afecta el uso del agua de los cultivos. Maas y Hoffman, caracterizaron la tolerancia de la planta a la sal, basado en la pérdida de rendimiento en función del aumento de la salinidad en la zona radicular. Su ecuación describe la tolerancia a la salinidad utilizando un valor límite en el que comienza la pérdida de rendimiento y un coeficiente que describe la tasa de pérdida de rendimiento con el aumento de la salinidad del suelo, más allá del valor límite de salinidad. Esta función de la salinidad y rendimiento proporciona una base para considerar el potencial del uso del agua de los cultivos de las aguas subterráneas poco profundas. En general, si la conductividad eléctrica (CE) del agua del suelo es menor que el umbral Maas-Hoffman CE para el cultivo, el uso potencial del agua debe estar limitada por otros factores distintos de la salinidad. La reducción en el consumo de agua por las plantas, se debe analizar cuando la CE del agua subterránea supere el umbral Maas-Hoffman.

La tolerancia a la salinidad no es un valor estático. Se ha observado que las plantas tienden a ser más tolerante a la sal en las etapas de crecimiento más tardías que en la germinación. Una amplia gama de cultivos han crecido con éxito en presencia de agua subterránea poco profunda y utilizan el agua subterránea para satisfacer una parte significativa de las necesidades de agua de los cultivos. La tolerancia a la sal de estos cultivos oscila entre sensible (lechuga) a tolerantes (algodón). La mayoría de los cultivos

utilizados en zonas donde se localizan aguas subterráneas poco profundas, son moderadamente tolerantes o tolerantes a la salinidad, basándose en el criterio Maas-Hoffman y son cultivos de raíces profundas. El cuadro 4, enumera los cultivos que se han sido utilizados con éxito, en presencia de aguas subterráneas poco profundas (Ayars et al., 2006).

Cuadro 4. Cultivos reportados en donde se utilizó exitosamente el agua subterránea poco profunda y las referencias bibliográficas.

Crop	Reference
alfalfa	Benz et al. (1983, 1987), Grimes and Henderson (1984), Kruse et al. (1993), Meyer et al. (1996), Meyer (1996), Smith et al. (1996); Zhang et al. (1999)
Bell pepper	Dalla Costa and Gianquinto (2002)
Carrot	Schmidhalter et al. (1994)
Corn (maize)	Follett et al. (1974), Benz et al. (1984), Kruse et al. (1985, 1993), Kang et al. (2001), Sepaskhah et al. (2003), Ragab and Amer (1986)
cotton	Namken et al. (1969), Williamson and Carreker (1970), Williamson and Kriz (1970), Wallender et al. (1979), Grimes and Henderson (1984), Ayars and Schoneman (1986), Ayars and Hutmacher (1994), Cohen et al. (1995), Hutmacher et al. (1996)
Eucalyptus	Thorburn et al. (1995)
Lettuce	Shih and Rahi (1984)
Millet	Stuff and Dale (1978)
Pasture	Shih and Snyder (1984)
Peach	Boland et al. (1996)
Safflower	Soppe and Ayars (2002)
Sorghum	Mason et al. (1983); Shih (1984); Robertson et al. (1993); Sepaskhah et al. (2003)
Soybean	Dugas et al. (1990); Meyer et al. 1990); Meyer (1996)
String bean	Williamson and Carreker (1970); Williamson and Kriz (1970)
Sugar beet	Follett et al. (1974), Benz et al. (1984, 1987)
Sugar cane	Escolar et al. (1971), Omary and Izuno (1995), Sweeney et al. (2001)
Sunflower	Mason et al. (1983)
Tomato	Ayars et al. (2001)
Wheat	Chaudary et al. (1974), Meyer et al. (1987), Kruse et al. (1993), Kang et al. (2001)

Fuente: Ayars et al. (2006)

La cantidad total de agua utilizada por los cultivos que se muestra en el cuadro 5, varía mucho en función de la salinidad de las aguas subterráneas, en relación con la tolerancia de los cultivos, el manejo del riego, la calidad del agua de riego, el tipo de suelo y la profundidad de las aguas subterráneas. El agua subterránea se utilizó en los cultivos de raíces poco profundas y cultivos que toleran el encharcamiento. La profundidad de la capa freática se incrementó para los cultivos con raíces más profundas. Debería ser posible aumentar la contribución del manto freático con una profundidad del nivel de agua variable.

El suelo seleccionado fue en general el tipo de suelo predominante en la zona. El uso máximo de agua de los cultivos, en general se presentó en los suelos francos, (franco arenoso, franco arenoso fino, franco arcilloso). A medida que aumentaba el contenido de arcilla, el porcentaje de contribución se redujo como resultado de la reducción de la conductividad hidráulica, por el aumento de contenido de arcilla, como se demuestra en la figura 26.

Muchos de los estudios y de los parámetros del estudio se resumen en el cuadro 5. En muchos casos, el porcentaje de contribución supera el 50% de las necesidades totales de agua (Kruse et al 1993;. Wallender et al 1979;.. Chaudry et al 1974).

Hutmacher et al., demostraron que los cultivos van a utilizar cantidades importantes de agua salina con una CE de tres a cuatro veces el umbral Maas Hoffman. Sin embargo, el porcentaje de contribución del agua del suelo disminuye rápidamente a medida que aumenta la salinidad y se requiere el riego para cumplir con el requerimiento de agua del cultivo para mantener el rendimiento.

Cuadro 5. Resumen de los estudios freáticos seleccionados que describen el uso de los cultivos de las aguas subterráneas poco profundas

Crop	Threshold (dS/m)	Climate	Water management		Water table		WT quality (dS/m)	Soil type	%GW	Ref.
			Rain (mm)	Irrig. Freq	Change	Depth (m)				
Corn	1.7	Semi-arid	< 250	2-3/week	Constant	0.6	0-6	Fine sandy loam	0-58	Kruse et al. (1993)
Corn	1.7	Semi-arid	< 250	2-3/week	Constant	1.05	0-6	Fine sandy loam	0-29	Kruse et al. (1993)
Cotton	7	Semi-arid	< 150	3-5 over 4 months	Variable	1.1-1.5	6	Clay loam	0-38	Ayars and Schoneman (1986)
Cotton	7	Semi-arid	180-380	Intermittent	Constant	0.9	0.9-6	Fine sandy loam	57	Namken et al. (1969)
Cotton	7	Semi-arid	180-380	Intermittent	Constant	1.8	0.9-6	Fine sandy loam	38	Namken et al. (1969)
Cotton	7	Semi-arid	180-380	Intermittent	Constant	2.7	0.9-6	Fine sandy loam	28	Namken et al. (1969)
Sugar beet	7	Semi-arid	ND	Weekly	Variable	1.0-1.7	0.5	Sandy loam	ND	Reichman et al. (1977)
String bean	1	Humid	NA	Weekly	Constant	0.15-0.7	NS	Sandy loam	ND	Williamson (1968)
Corn	1.7	Semi-humid	< 250	Weekly	Constant	0.5,1,1.6,2	NS	Sandy loam	ND	Doering et al. (1976)
Tomato	2.5	Semi-arid	0	2-3/week	Constant	1.1	0.6-10	Clay loam	9-34	Hutmacher and Ayars(1991)
Alfalfa	2	Semi-humid	< 250	Weekly	Constant	0.4,1,1.5,2	NS	Sandy loam	63	Benz et al. (1987)
Sugar beet	7	Semi-humid	< 250	Weekly	Constant	1.55	NS	Sandy loam	63	Benz et al. (1984)
Lettuce	1.3	Humid	NA	Variable	Constant	0.4,0.6,0.85	NS	Muck	ND	Shih and Rahi (1984)
Alfalfa	2	Semi-humid	< 250	Weekly	Constant	0.4,1,1.6,2.1	NS	Sandy loam	28-57	Benz et al. (1984)
Cotton	7	Semi-arid	ND	ND	Variable	ND	ND	Loam to clay loam	10-53	Grismer and Gates (1988)
Alfalfa	2	Semi-arid	100	As needed	Constant	0.1	16	Loam to clay loam	19	Zhang et al. (1999)
Cotton	7	Semi-arid	100	As needed	Variable	1.7-2.1	6	Loam to clay loam	59-70	Wallender et al. (1979)
Millet	Na	Humid	ND	ND	Constant	0.76	NA	Sandy loam	NA	Williamson et al. (1969)
Corn	1.7	Semi-humid	< 250	As needed	Variable	1.5-2	ns3	Sandy loam	NA	Reichman et al. 1986
Cotton	7	Arid	< 250	2-3/week	Constant	1.2	0.3-30	Clay loam	0-42	Hutmacher et al. (1996)
Corn	1.7	Humid	< 50	No irrigation	Constant	1.05	NS	Silt loam	0-27	Stuff and Dale (1978)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	0.6	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	70	Chaundry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	0.9	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	53	Chaundry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	1.2	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	27	Chaundry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	1.5	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	20	Chaundry et al. (1974)
Sweet sorghum	Na	Humid	ND	Maintain water level	Constant	0.3, 0.6, 0.9	NS	Muck	ND	Shih 1984)
Corn	1.7	Semi-humid	< 250	Weekly	Declining	0.6-1.5	0.6	Fine sandy loam		Follet et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	Yes	Weekly	Constant	0.6-1.0	6	Fine sandy loam	23-93	Kruse et al. (1993)
Sorghum	Na	Semi-arid	Yes	Well watered	Variable	1-1.5		Clay loam to clay	42	Mason et al. (1983)
Corn	1.7	Semi-arid	Yes	Well watered	Variable	1-1.6		Clay loam to clay	40	Mason et al. (1983)
Sunflower	Na	Semi-arid	Yes	Well watered	Variable	1-1.7		Clay loam to clay	32	Mason et al. (1983)
Cotton	7	Semi-arid	Yes	3 and 14 day	Variable	1-1.5	28-35	Clay loam to clay		Cohen et al. (1995)
Sugar cane	Na	Humid	Yes		Constant	1,1.5,2,2.5,3,4	NS	Silty clay loam		Escolar et al. (1971)
Carrot	Na	Humid	Yes		Constant	1,1.5,2,2.5,3,4	NS	Silty clay loam		Schmidhalter et al. (1994)
Eucalyptus	Na	Semi-arid	Yes	NA	Variable			Clay		Thorburn et al. (1995)
Corn	1.7	Semi-arid	Yes	Deficit 50 mm	Constant	0.6-1.3	11	Clay loam	16-29	Prathapar and Meyer (1992)
Sugar cane	Na	Humid	No		Constant	0.5-1		Clay loam	65	Omary and Izuno (1995)
Corn	1.7	Semi-arid	Yes	As needed	Variable	0.4	NS	Clay loam	42	Ragab and Amer (1986)
Wheat	2	Semi-arid	Yes	As needed	Variable	0.4	NS	Clay loam	42	Kang et al. (2001)
Maize	1.7	Semi-arid	Yes	As needed	Variable	0.4	NS	Clay loam	42	Kang et al. (2001)
Winter wheat	2	Semi-arid	Yes	Soil water depletion	Constant	0.5,0.8,1,1.2,1.5,2,2.5		Loam		Zhang et al. (1999)
Peaches	Na	Semi-arid	Yes	Regulated Deficit Irrig.	Constant	1.4	0.1, 2	Silty clay loam	28,11,15,7	Boland and Jerie (1996)
Alfalfa	2	Semi-arid	Yes	80 mm threshold	Constant	1	0.1	Loam	54	Smith et al. (1996)

ND No data, NA not applicable, NS non saline

Fuente: Ayars et al. (2006)

La temporada de crecimiento de los cultivos impactará en el uso total de agua de varias maneras. Un cultivo perenne tendrá una zona radicular bien desarrollada en el segundo y subsiguientes años de producción y por lo tanto la zona de raíces estará bien posicionada para utilizar el agua durante toda la temporada de crecimiento. Los cultivos anuales tienen un sistema de raíces que crece cada año y tienen un tiempo disponible limitado para utilizar el agua subterránea poco profunda.

Si el cultivo tiene corto período de crecimiento (90 días) hay oportunidad limitada para el uso de estos cultivos en comparación con un cultivo con un período de crecimiento de 200 días. El algodón en el Valle de San Joaquín en California se cultiva en áreas con niveles freáticos altos, las investigaciones han demostrado que hasta un 60% de las necesidades de agua del cultivo se pueden satisfacer de una manto freático salino (7 dS/m) a una profundidad entre 1 y 2 m (Wallender et al.).

5.4. Presencia de un sistema de drenaje

El propósito de un sistema de drenaje es eliminar el agua y proporcionar una zona de aireación a la raíz, sin embargo, la profundidad aireada requerida variará con el crecimiento y la temporada de cultivo. Si un sistema de drenaje está instalado y no es controlado, la eficacia de un plan de gestión del agua utilizando agua subterránea poco profunda puede reducirse, porque el agua disponible es insuficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Se definen como sobre-drenaje, cuando el flujo de drenaje no controlado aumenta la profundidad del agua y limita su uso para los cultivos. Para que los cultivos utilicen eficientemente las aguas subterráneas poco profundas, el nivel freático tendrá que ser mantenido a una profundidad predeterminada.

El escenario ideal sería contar con un nivel freático cercano a la parte inferior de la zona de las raíces de los cultivos en las primeras etapas de crecimiento y que retroceda a medida que se desarrolla la zona radicular. Se debe mantener una distancia relativamente constante entre la parte inferior de la zona de la raíz y la zona saturada. Esto conceptualmente permitiría el uso máximo de agua por el cultivo de las aguas subterráneas poco profundas. La distancia dependerá del tipo de suelo, cercana cuando se tenga arena y progresivamente mayor para el suelo de textura más fina, así como del sistema de riego y su gestión. Los sistemas con mala uniformidad y grandes pérdidas potenciales por percolación profunda, requerirían una mayor distancia entre la zona de la raíz y la capa freática.

5.5. Sistema de riego y su gestión

El manejo del sistema de riego tiene un impacto directo sobre el potencial de uso de agua de los cultivos. Esto incluye la lámina aplicada, la uniformidad de la aplicación, y la frecuencia de aplicación. En campos con drenaje controlado existe el potencial para la redistribución de las aguas subterráneas a través del sistema de drenaje subterráneo que contribuirá a las aguas subterráneas, en las zonas bajas de riego.

La frecuencia de riego y la lámina de agua aplicada para reponer el agua del suelo perdida, son los principales determinantes del volumen de agua extraída de las aguas subterráneas poco profundas. Investigaciones realizadas por Benz *et al.*, demostraron el efecto de la lámina aplicada sobre el uso del agua subterránea por la alfalfa, maíz, remolacha azucarera. Los datos en la figura 27 muestran el uso de las aguas subterráneas poco profundas de un experimento en alfalfa que repone agua del suelo

sobre una base semanal a tasas de 0.3, 0.8, y 1.3 veces ET. Los datos muestran que la contribución del agua subterránea aumenta a medida que el nivel de sustitución disminuye. La mayoría del uso de agua del cultivo se produjo al final del intervalo de riego justo antes del siguiente riego. El gradiente máximo del potencial del agua en el suelo, se desarrolló en este momento lo que resultó en una mayor contribución. Esto significa que la alta frecuencia de riegos, diaria o casi diaria, reduce el potencial de captación de agua subterránea.

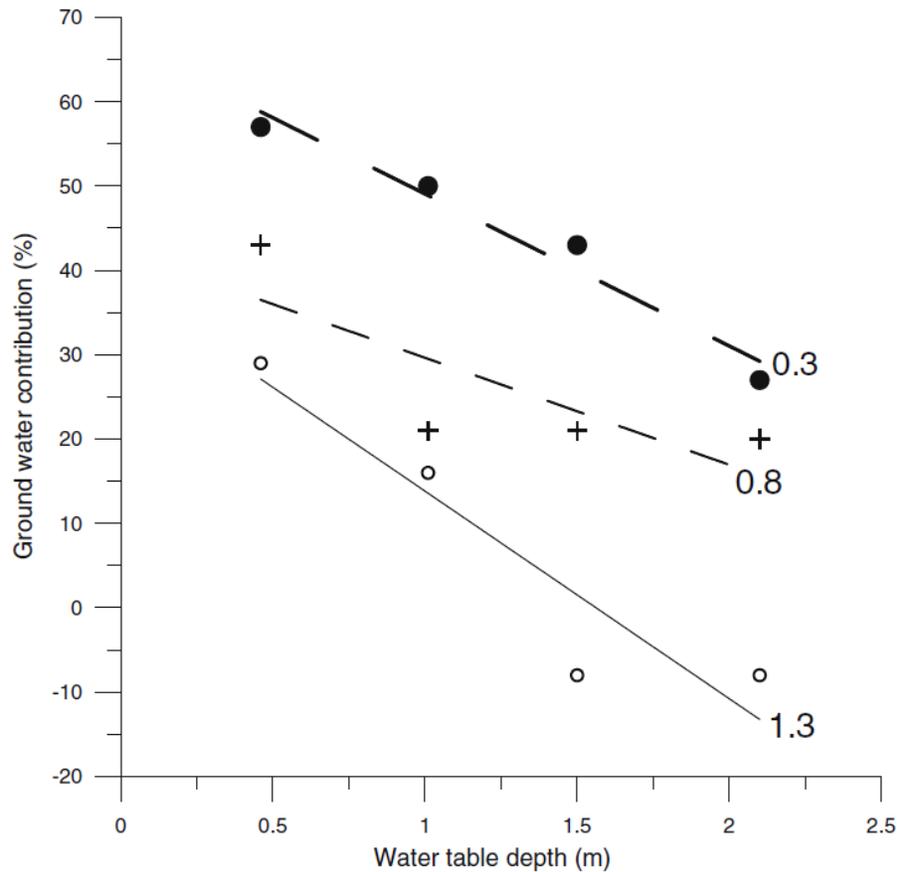


Figura 27. Aporte de agua subterránea para el cultivo de alfalfa en respuesta a los niveles de riego (Benz et al., 1987)

Fuente: Ayars et al. (2006)

Investigaciones desarrollaron coeficientes de cultivo (K_c) para el algodón como una función de la profundidad y salinidad de las aguas subterráneas, que pueden ser utilizados para programar el riego del algodón en la presencia de agua subterránea superficial salina. El coeficiente extiende de manera efectiva el intervalo de riego y da cuenta de la extracción de agua del suelo y del flujo ascendente del agua subterránea. Varios de los coeficientes se dan en la figura 28.

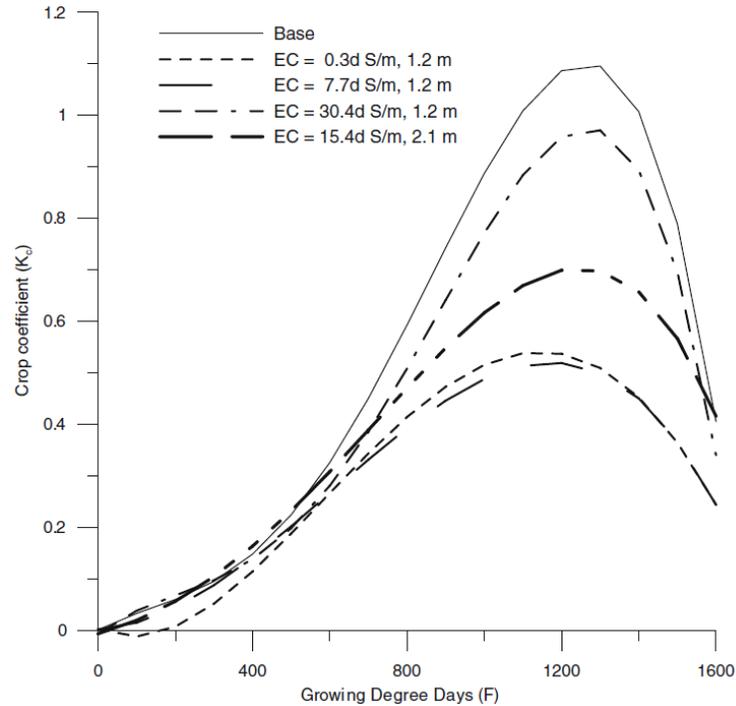


Figura 28. Coeficientes de cultivo de algodón, en función de la calidad del agua subterránea y la profundidad de las aguas subterráneas. Ayars y Hutmacher (1994)

Fuente: Ayars et al. (2006)

La cantidad de agua consumida por los cultivos, se caracteriza por la diferencia entre la curva base, y la curva que representa la calidad del agua del suelo y la profundidad de las aguas subterráneas. La curva base es igual a la ET, que es el agua que se extrae del suelo sin ninguna aportación de agua subterránea. Se nota que a principios de la temporada de crecimiento, no hay diferencia entre las curvas de K_c y no hay contribución del manto freático al consumo de agua de las plantas. La contribución máxima se produce al final de la temporada de crecimiento y en el riego de superficie después de la última temporada de riego.

La gestión del riego es uno de los principales factores de confusión en la cuantificación del potencial de uso de agua del cultivo de las aguas subterráneas poco profundas. Los datos muestran que con nivel freático somero, hay alguna contribución de aguas subterránea, incluso con exceso de riego. El aporte de agua subterránea aumenta a medida que la sustitución de agua se reduce. Resultados demuestran la necesidad de establecer un gradiente de potencial hídrico del suelo en el perfil para inducir el uso del agua de las aguas subterráneas poco profundas. Esto requiere un período de agotamiento del agua antes de la irrigación, pero sin llegar a estresar en exceso a la planta.

El agua subterránea poco profunda es potencialmente una valiosa fuente de abastecimiento de agua adicional para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos

en condiciones húmedas, áridas, y semiáridas. Sin embargo, la aplicación de esta técnica es en un sitio específico y requiere de un análisis detallado de los patrones proyectados de cultivo, los recursos suelo y agua, y la gestión del riego.

La práctica estará limitada por la fuente de suministro del agua subterránea, la gestión de la salinidad y otros elementos en el perfil del suelo. Esta práctica es posible en ambas áreas drenadas y no drenadas. Sin embargo, se debe considerar cuidadosamente antes de su aplicación en áreas no drenadas afectadas por las aguas subterráneas poco profundas, porque la acumulación de sales en la zona radicular será más difícil de manejar.

Con respecto a los estudios sobre el aporte de agua del manto freático al requerimiento de agua por parte de los cultivos, a continuación se resumen algunos casos encontrados en la literatura.

Carlson et. al. (2014), utilizaron el método de las fluctuaciones diurnas del nivel freático para calcular la evapotranspiración y los flujos del agua subterránea en dos épocas de cultivo (2006-2007), en 15 humedales. El promedio de la evapotranspiración para estos lugares estuvo en el rango de 4.0 a 6.6 mm/día, y se obtuvieron aportes del agua subterránea en el rango de los 2.5 a 4.3 mm/día.

Liu y Luo (2011), reportaron experimentos para cuantificar los efectos del nivel freático somero en el uso del agua y en el rendimiento del trigo de invierno en condiciones de seco, utilizando un lisímetro. Los resultados que obtuvieron, fue que, bajo condiciones de seco, la contribución de agua subterránea fue más del 65% de la evapotranspiración potencial del trigo, con la precipitación incluida, y con una profundidad del nivel freático entre 40 a 150 cm.

Luo y Sophocleous (2010), investigaron la contribución del agua subterránea al requerimiento de riego para el cultivo de trigo, mediante la combinación de observaciones con lisímetro y modelos numéricos. Un lisímetro de pesada su utilizó para estimar la evaporación y para calibrar y validar el modelo HYDRUS-1D, con el cual se realizaron simulaciones de escenarios de la evaporación del agua subterránea bajo diferentes profundidades del nivel freático y entradas de agua (lluvia y riego). La tasa promedio estacional de la contribución de agua subterránea a los cultivos está en función de las entradas de agua estacional y de la profundidad del nivel freático. El valor máximo de contribución al requerimiento de agua del cultivo fue del 75% y se observó en el caso en donde el nivel freático estaba a un metro de profundidad, y sin aplicación de riego. El valor mínimo de contribución fue del 3%, y se dio en el caso en donde el nivel freático estaba a tres metros de profundidad y se aplicaron tres riegos

En regiones con nivel freático superficial, el agua subterránea puede tener un impacto positivo o negativo en los cultivos 2009, (Nosetto et. al., 2009). Recíprocamente, los cultivos pueden influir en el agua subterránea, alterando el nivel freático y la composición química del agua. Un óptimo rango de la profundidad del agua subterránea, en donde los

cultivos obtienen los más altos rendimientos, en la región las Pampas en Argentina, para maíz es entre 1.40 a 2.45 m, 1.20 a 2.20 m para soya y de 0.70 a 1.65 m para el trigo. Las áreas que tienen ese rango de profundidades óptimas tuvieron rendimientos de 3.7, 3 y 1.8 veces más grandes, que aquellas áreas en donde la profundidad del manto freático estaba a más de 4 metros, para trigo, maíz y soya, respectivamente.

Babajimopoulos et. al., publicaron en el año 2007, un estudio sobre la aplicación del modelo matemático SWBACROS para estimar la contribución de agua subterránea superficial a las necesidades de agua de un cultivo de maíz. Encontraron que bajo condiciones específicas de campo, aproximadamente 3.6 mm/día del agua encontrada en la zona de la raíz, provenía de manto freático superficial, el cual representa cerca del 26% del agua transpirada por el maíz.

Wang et. al. (2004), utilizaron el modelo agrohidrológico SWAP para analizar el flujo de agua y transporte de sales, para diferentes profundidades del nivel freático y propuestas de riego, integrados en seis escenarios simulados. El principal objetivo del trabajo fue estudiar el efecto de la profundidad del nivel freático bajo diferentes cantidades de riego, en la humedad y contenido de sales del suelo y sobre el rendimiento relativo de los cultivos de maíz y trigo. En los escenarios se obtuvo que el agua subterránea contribuyó a la evapotranspiración entre 44 y 494 mm de agua, obteniéndose rendimientos relativos para el maíz entre 54 y 72% y para el trigo de 38 a 67%.

Ahmad et al.(2002), aplicaron el modelo numérico Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) para calcular el contenido de humedad y los flujos verticales de agua en el suelo en la zona no saturada para sistemas de cultivo de algodón-trigo y arroz-trigo en Punjab, Pakistán. Como resultado reportan que cuando el manto freático está entre 3 y 8 metros de profundidad el flujo vertical del agua es esencialmente nulo. Después de los riegos o de eventos de lluvia, el flujo de agua es descendente, en cambio en la época de sequía, el agua asciende desde el manto freático. En las áreas cultivadas a una profundidad de 2 metros, el flujo vertical del agua (ascendente y descendente) varía conforme al mes. En el área cultivada con arroz-trigo, el flujo descendente de agua anual fue de 34.48 cm, y el flujo ascendente de 6.96 cm. En el área cultivada con algodón-trigo, el flujo descendente de agua anual fue de 38.91 cm, y el flujo ascendente de 8.44 cm.

En el año 2002, Daranelli y Collino, publicaron un estudio cuyo objetivo fue estimar la contribución de agua subterránea al consumo de agua de la alfalfa en diferentes ambientes, en un periodo de cuatro años y en cuatro localidades. La contribución fue estimada considerando la eficiencia en el uso del agua del cultivo, y el consumo de agua de las capas superiores de suelo. La contribución varió entre localidades, entre 15 y 25% del agua consumida por el cultivo, y no estuvo relacionado con la profundidad del nivel freático.

Ayars reportó en 1996, los resultados de dos estudios de campo realizados en el lado oeste del Valle de San Joaquín en California, para demostrar el potencial del manejo integral de los sistemas de irrigación y de drenaje. En el primer estudio, hecho en una

parcela cultivada con algodón y regada por goteo subterráneo, con una manto freático a 1.5 metros de profundidad, obtuvo que un 40% del requerimiento de agua del cultivo provino del agua subterránea, sin pérdidas en el rendimiento. El segundo estudio evaluó el impacto de la instalación de un sistema de drenaje subterráneo controlado, instalado en 65 hectáreas de tomate. Como resultado, el cultivo requirió 140 mm menos de agua como riego y no hubo pérdida de rendimiento.

6. Modelación y simulación

A pesar del desarrollo de sofisticados modelos matemáticos y grandes avances en las computadoras, se han desarrollado muy pocos modelos para diseñar sistemas de drenaje como una parte de un manejo integral del agua en el suelo

Ayars y Evans (2015), citando a Fouss, mencionan que el manejo de los sistemas de drenaje subterráneo, pueden clasificarse en pasivos o activos. En los pasivos, a los drenes se les permite descargar libremente, sin regular el flujo o controlar el nivel freático. En el manejo activo, en los sistemas de drenaje, se controla la descarga y el nivel freático. En estos casos, el control se consigue cambiando la elevación de la estructura de salida con respecto a la solera de los drenes o con una válvula en la salida del dren. Esto resulta en el incremento del nivel freático detrás de la estructura. Una alternativa, es el bombeo de agua superficial dentro de los drenes enterrados para temporalmente incrementar la elevación de nivel freático. Esto se hace posible cuando los campos están casi al mismo nivel y con suelos ligeros (Doty y Parsons, 1979). Los beneficios del manejo activo en áreas húmedas pueden ser el almacenamiento del agua de lluvia para soportar el crecimiento de los cultivos. En áreas con topografía relativamente plana, el sistema de drenaje puede tener un doble uso, como sistema de riego subterráneo y sistema de drenaje.

Con el manejo integral se tiene la necesidad de modificar la programación de riegos, para incorporar el aporte de agua del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos (Ayars y Hutmacher, 1994). En adición a esto, es necesario desarrollar coeficientes de los cultivos y procedimientos para su estimación, para usarlos en programas de riego que incluyan la contribución directa del manto freático y los efectos de la salinidad en la producción.

Skaggs citado por Ayars y Evans (2015), clasificó los modelos de simulación en dos tipos. En el primero, se resuelve la ecuación de Richards para el flujo no saturado en la zona por encima del nivel freático y se utilizan ecuaciones de aproximación para el flujo saturado hacia los drenes. En el segundo enfoque se realiza un balance de agua para describir los flujos y el régimen de agua en el suelo por encima del nivel del agua subterránea, y se usa un enfoque analítico para el flujo saturado por debajo del nivel freático. La revisión se enfocó en dos modelos, SWATRE (Feddes et al., 1978) y DRAINMOD (Skaggs, 1977). El modelo SWATR(E) ejemplifica el primer enfoque y DRAINMOD al segundo.

El modelo SWATR(E) se actualizó y actualmente se le conoce como el modelo SWAP3.2. El modelo SWAP3.2 está diseñado para simular el proceso de flujo y transporte a nivel de campo durante la estación de crecimiento y para periodos largos de series de tiempo. Ha sido adaptado para modelos regionales usando métodos y programas con ambiente GIS. El modelo resuelve la ecuación de Richards unidimensional (vertical) con énfasis en el proceso de flujo y transporte en la zona no saturada. El flujo lateral en la zona saturada es calculado usando fórmulas de drenaje (por ejemplo, la ecuación de Hooghoudt). El modelo se compone de: flujo del agua en el suelo (vertical), flujo del calor del suelo, flujo de solutos, crecimiento del cultivo y flujo en macroporos. Ha sido usado en el análisis experimental de pruebas de campo y evaluación de las alternativas en el manejo del agua. También puede usarse en apoyo a las decisiones cuando se acopla con modelos para el transporte de pesticidas (PEARL) y ciclos de los nutrientes (ANIMO). Desde la perspectiva del diseño del drenaje, el modelo SWAP3.2, es útil para calcular el valor del flujo que aporta el agua subterránea que puede realmente reflejar el uso consuntivo del cultivo y el transporte dentro de la zona no saturada.

El modelo de simulación más conocido y usado extensivamente es el DRAINMOD. Este fue desarrollado para el diseño y evaluación de múltiples componente del drenaje y sistemas relacionados con el manejo del agua (Skaggs, 2008). El modelo realiza un balance de agua, día por día, hora por hora. Calcula la ET, escurrimiento, subirrigación, la infiltración profunda, la profundidad del nivel freático y el estado de la humedad del suelo dentro del perfil en cada paso de tiempo. Estos resultados pueden ser usados para evaluar la productividad y otras características agronómicas. Las simulaciones son generalmente ejecutadas para periodos largos de 20 a 50 años, con pasos de tiempo de horas o días, para caracterizar la variabilidad dentro del sistema. Se pueden usar múltiples ejecuciones para evaluar los diseños y determinar la alternativa más rentable.

Otros modelos similares a DRAINMOD y SWAP que no son tan conocidos, se presentan en Acharya y Mylavarapu (2015), Dietrich (2007), Parsons (1990) y El-Sadek et al. (2001).

Existen más modelos, con la característica que son unidimensionales y que no tratan de forma completa la simulación del régimen de humedad en el suelo (utilizando el riego y drenaje controlado). Una gran parte de los modelos, estudian el balance hídrico en suelos con manto freático poco profundo, incluyendo el aporte de agua subterránea al cultivo, (Wu et al., 2015, Mensague et al., 2015, Satchithanatham et al., 2014, Luo y Sophocleous, 2010, Degioanni et al., 2006, Dalton, 2006, Dardanelli et al., 2002, Ahmad et al., 2002, Torres et al., 1989). Existen estudios que analizan la dinámica del agua en sistemas de drenaje subterráneo, como el propuesto por Zavala et al. (2014, 2012, 2011, 2005), así como por Saucedo y Fuentes (2002). Por último, están las investigaciones que modelan la evaporación-evapotranspiración (Cesanelli y Guarracino, 2009, Guarracino y Cesanelli, 2008, Álvarez et al., 2005).

En este trabajo se desarrolló y codificó un algoritmo para estimar el aporte de agua del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos. El código inicial se muestra a

continuación, el cual conforme se ejecuta, llama a varias subrutinas, las cuales, por cuestiones de espacio no se presentan.

```
format long e;  
salida = Inicio
```

```
nnuto=500;  
sbr=2;  
tamvecd=nnuto*nnuto-(nnuto-sbr)*(1+nnuto-sbr);
```

```
K=zeros(tamvecd);  
B=zeros(nnuto+1);  
M=zeros(nnuto+1);  
sol=zeros(nnuto+1);  
xxx=zeros(nnuto+1);  
Q=zeros(nnuto+1);  
potant=zeros(nnuto+1);  
potest=zeros(nnuto+1);  
V=zeros(nnuto+1);  
potcen=zeros(nnuto+1);  
Z=zeros(nnuto+1);  
theta=zeros(nnuto+1);  
Kh=zeros(nnuto+1);  
Cesp=zeros(nnuto+1);  
thetaini=zeros(nnuto+1);  
flux=zeros(nnuto+1);
```

```
dtini=0.1;  
dt=dtini;
```

```
mall=1;
```

```
if (mall==0)  
    dz=1.; %cambiÃ© el valor de 1 a
```

```
        for i=1:nnuto  
            Z(1)=0.;  
            Z(i)=Z(i-1)+dz;  
        end;  
end;
```

```
if(mall==1)  
    prof=40.;  
    dzu=1.;  
    Z(1)=0.;
```

```

poten=1.5;
n=1;

for i=2:nnuto
Z(i)=(2.^(poten-1.))*((n*dzu)^poten)*(prof^(1.-poten));

if( (Z(i)-Z(i-1))>1. )
    Z(i)=Z(i-1)+1.;
end
    n=n+1;
end;
end;

%valores iniciales
tiem=dtini;
for i=1:nnuto
    potant(i)=Z(i)-100.;
end

```

El código calcula la transferencia de agua entre el manto freático, el perfil del suelo y los cultivos, en este caso se escogió el maíz. El programa calcula el flujo de agua en función de la profundidad de la raíz. Las características hidrodinámicas del suelo considerado, se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Características hidrodinámicas del suelo

Textura	Franco arcilloso
θ_s (cm ³ /cm ³)	0.5
θ_r (cm ³ /cm ³)	0.0
K_s (cm/h)	3.0
η	11.0
m	0.1258
n	2.2878
ψ_d (cm)	-100.0

Al ejecutar el código, como resultado se obtienen, los valores de potencial del agua en la superficie del suelo, contenido de humedad, la profundidad del nivel freático, el flujo de agua a diferentes profundidades, y principalmente a la profundidad de la raíz del cultivo (cuadro 7).

Cuadro 7. Resultados del archivo lamina1d

Tiempo	lamina en el Q[mmuto],	flu Q[mmuto/2],	contar, núm	poten[1],	pi theta[1],	con	poten[mmut theta[mmuto]	Profundidad	flux[5],	flujo flux[10],	flujo flux[20],	flujo flux[30],	flujo flux[39],	flujo flux[50],	flujo flux[60],	flujo flux[69],	flujo flux[80],	flujo flux[90],	flujo Q[1],	flujo e fluxratz,	flujo potant[1],	pc	
1.16E-06	0	0	0	2	-100	0.458248	396.037	0.5	100	-2.68E-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.33E-11	0	-100
2.43E-06	-3.93E-08	0	0	2	-100	0.458248	396.037	0.5	100	-7.46E-11	-5.53E-17	5.87E-18	0	3.84E-18	-4.40E-18	0	5.27E-18	2.82E-18	0	-2.79E-11	0	-100	
3.83E-06	-8.82E-08	0	0	2	-100	0.458248	396.037	0.5	100	-3.95E-10	-6.89E-16	5.87E-18	0	3.84E-18	0	0	5.27E-18	0	-1.46E-18	-4.40E-11	0	-100	
5.37E-06	-1.65E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-1.22E-09	-4.96E-15	5.87E-18	0	1.15E-17	0	0	5.27E-18	-2.82E-18	0	-6.17E-11	0	-100.001	
7.07E-06	-2.10E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-2.83E-09	-2.56E-14	1.17E-17	6.80E-18	1.15E-17	4.40E-18	-4.89E-18	5.27E-18	0	0	-8.11E-11	6.23E-18	-100.001	
8.93E-06	-2.83E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-5.55E-09	-1.05E-13	5.87E-18	0	7.69E-18	4.40E-18	-4.89E-18	0	0	-1.46E-18	-1.03E-10	0	-100.001	
1.10E-05	-3.64E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-9.62E-09	-3.67E-13	1.17E-17	6.80E-18	1.15E-17	4.40E-18	-4.89E-18	0	-2.82E-18	-1.46E-18	-1.26E-10	0	-100.001	
1.32E-05	-4.55E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-1.52E-08	-1.12E-12	5.87E-18	0	7.69E-18	1.76E-17	-4.89E-18	0	0	0	-1.52E-10	-6.23E-18	-100.001	
1.57E-05	-5.56E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-2.25E-08	-3.09E-12	5.87E-18	0	1.15E-17	8.81E-18	4.89E-18	0	-2.82E-18	-4.38E-18	-1.80E-10	0	-100.001	
1.84E-05	-6.68E-07	0	0	2	-100.001	0.458247	396.037	0.5	100	-3.14E-08	-7.79E-12	5.87E-18	6.80E-18	1.54E-17	4.40E-18	0	0	0	-4.38E-18	-2.12E-10	-6.23E-18	-100.001	
2.14E-05	-7.92E-07	0	0	2	-100.002	0.458247	396.037	0.5	100	-4.18E-08	-1.51E-11	5.87E-18	1.36E-17	3.84E-18	8.81E-18	4.89E-18	0	-2.82E-18	-7.30E-18	-2.46E-10	0	-100.002	
2.48E-05	-9.29E-07	0	0	2	-100.002	0.458247	396.037	0.5	100	-5.36E-08	-3.95E-11	5.87E-18	1.36E-17	1.15E-17	4.40E-18	4.89E-18	0	-2.82E-18	-1.02E-17	-2.84E-10	-6.23E-18	-100.002	
2.84E-05	-1.08E-06	0	0	2	-100.002	0.458247	396.037	0.5	100	-6.66E-08	-8.10E-11	-5.87E-18	1.36E-17	0	4.40E-18	4.89E-18	0	0	-1.31E-17	-3.26E-10	0	-100.002	
3.24E-05	-1.25E-06	0	0	2	-100.002	0.458247	396.037	0.5	100	-8.07E-08	-1.57E-10	-1.76E-17	6.80E-18	-3.84E-18	8.81E-18	4.89E-18	0	-2.82E-18	-1.31E-17	-3.72E-10	6.23E-18	-100.002	
3.68E-05	-1.43E-06	0	0	2	-100.002	0.458246	396.037	0.5	100	-9.54E-08	-2.90E-10	-4.11E-17	6.80E-18	3.84E-18	4.40E-18	4.89E-18	0	0	-7.30E-18	-4.22E-10	0	-100.002	

El esquema numérico se codificó en lenguaje de programación C++ y se ejecutó para simular el aporte de agua del manto freático, variando la profundidad inicial de éste (PNFi). En la figura 29, se muestra el comportamiento de las profundidades del nivel freático, variando la profundidad inicial de éste, desde un metro de profundidad (manto freático somero) hasta 5 metros.

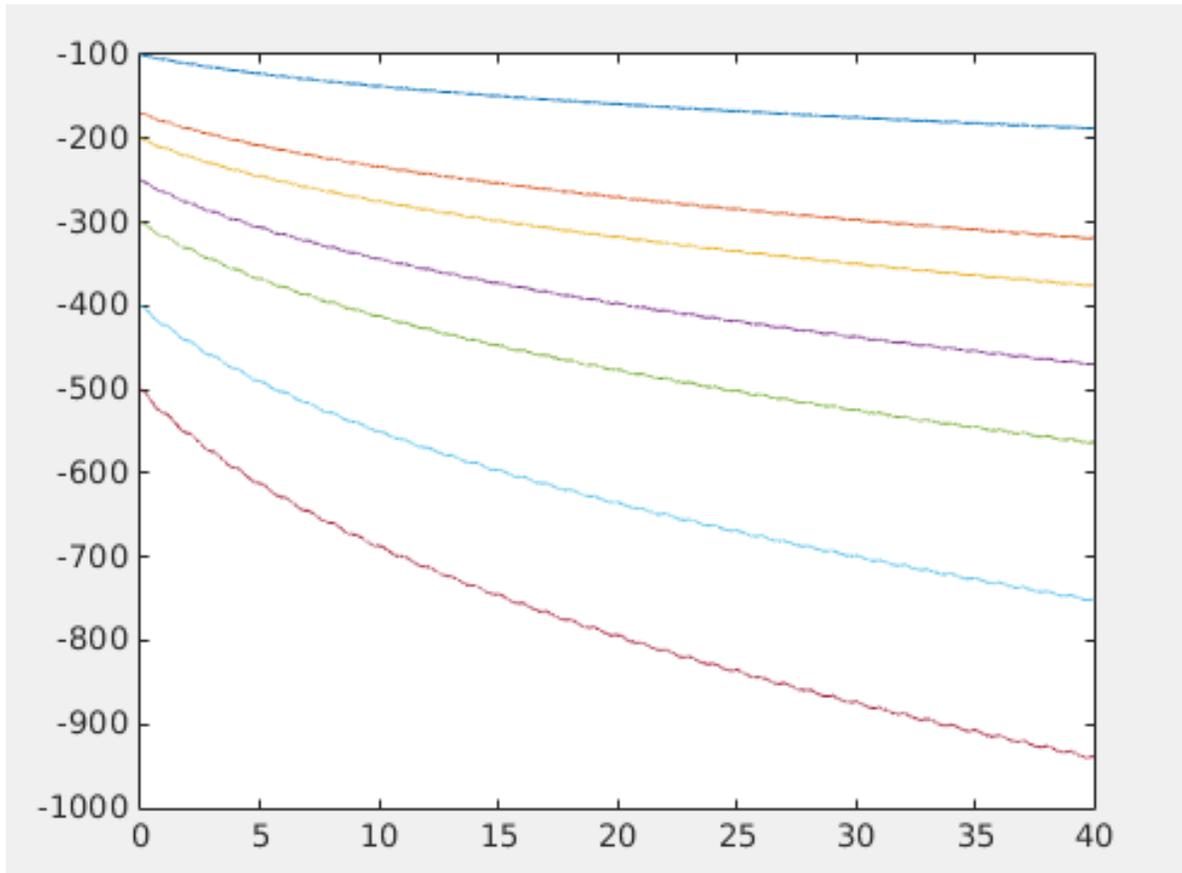


Figura 29. Comportamiento de la profundidad del nivel freático, con diferentes profundidades iniciales del nivel freático

En la figura 30, se muestra el comportamiento en el tiempo, de los flujos de agua que se presentan en la zona radicular del cultivo y que la planta utiliza para su requerimiento de agua.

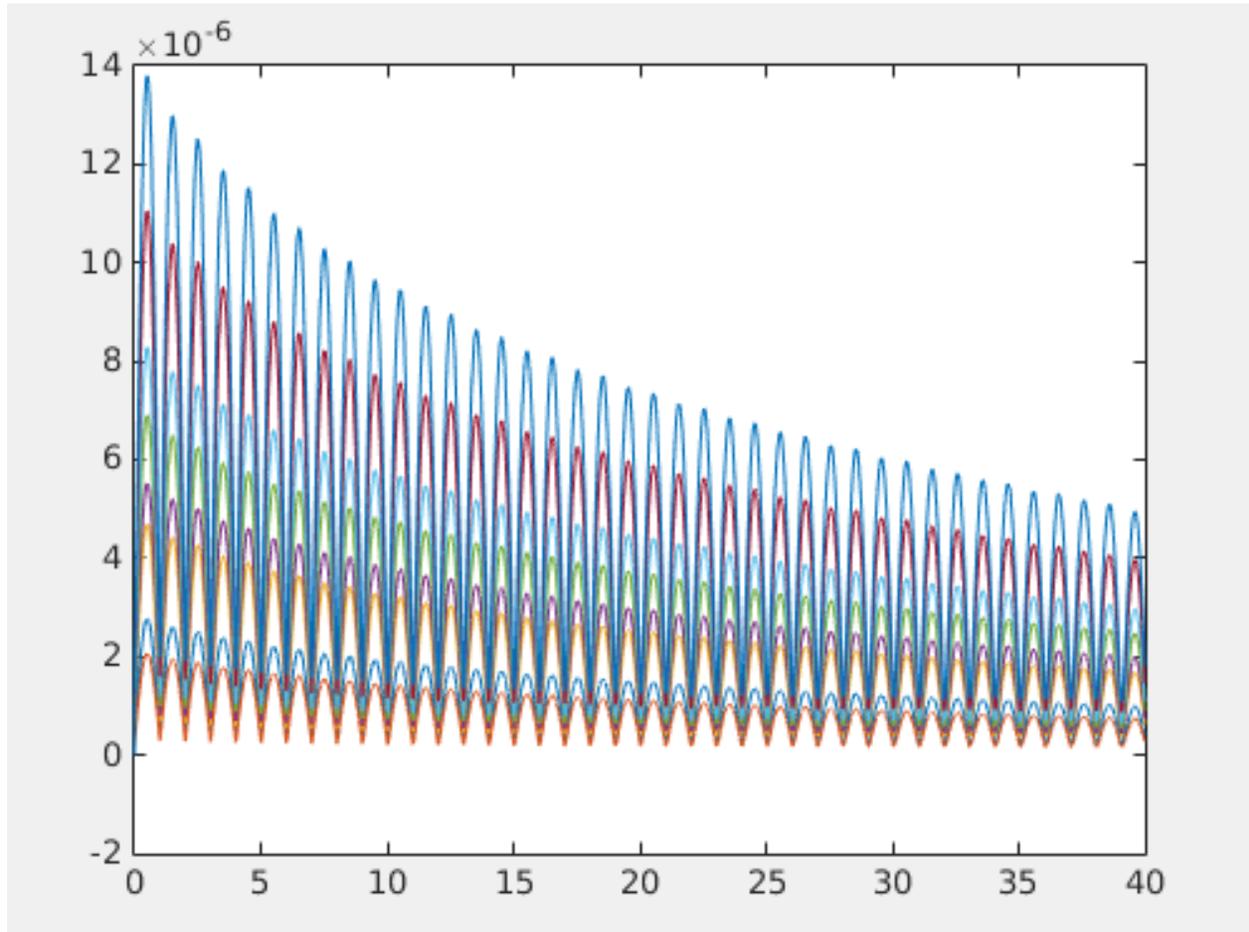


Figura 30. Flujos de agua en la zona radicular

7. Aspectos ambientales

7.1. Efectos del drenaje en el ambiente

Además de ejercer influencia en los suelos, el drenaje también afecta el escurrimiento de los ríos, condiciones hidrológicas, hidrogeológicas e incluso en las condiciones microclimáticas de los territorios que rodean al área drenada. Esta influencia es tanto más notable cuando los sistemas de drenaje abarcan grandes superficies, que miden en decenas y aún centenas de miles de hectáreas. A continuación se señalan algunas formas concretas de la influencia del drenaje de grandes territorios (COLPOS, 1989).

1) El drenaje de tierras cambia el hidrograma fluvial sobre todo cuando la superficie drenada constituye una parte considerable de la cuenca del río. El drenaje puede causar un aumento o una disminución del gasto máximo del río, así como la inundación de los territorios localizados aguas abajo.

- 2) Las aguas efluentes de drenaje por regla general están enriquecidas con sustancias lixiviadas de los suelos. Estas incluyen sustancias en suspensión y en solución, incluyendo tanto nutrientes como sustancias tóxicas. Por esta razón el drenaje puede ser una causa de contaminación de las aguas superficiales.
- 3) El drenaje, sobre todo el que se localiza en suelos permeables, puede ocasionar un desecamiento excesivo de las tierras, una mayor erosión de los suelos, cambios en la vegetación y en la fauna.
- 4) Las sustancias descargadas en el drenaje pueden afectar a la salud humana (Acevedo *et al.*, 2002)

7.2. Efectos en la hidrología

Con respecto al punto uno, en el año de 1986, Guillian *et al.*, publicaron en un artículo el efecto del drenaje agrícola de tierras. En este estudio se investigó el efecto hidrológico y de la calidad del agua, del desmonte, drenado y desarrollo de terrenos, en suelos pobremente drenados, en Carolina del Norte. Los experimentos se realizaron en dos pares de sitios (101 y 102, 106 y 107), en uno se desmontó y se adecuó para la producción agrícola y el otro permaneció con la vegetación nativa. Se midieron los parámetros hidrológicos y de calidad del agua, durante tres años (1977-1979).

El más dramático efecto del desarrollo agrícola de las tierras en la hidrología, es el incremento del gasto pico, cerca de tres veces más altos en los sitios desarrollados con respecto a los no desarrollados (figura 31), para un suelo mineral con una capa superficial orgánica (sitios 101 y 102) y para un suelo orgánico poco profundo (sitios 106 y 107). Los sitios 101 y 106 fueron plantados con una rotación de soya-maíz, mientras que la cobertura en los sitios 102 y 107 fue en su mayoría pino forestal.

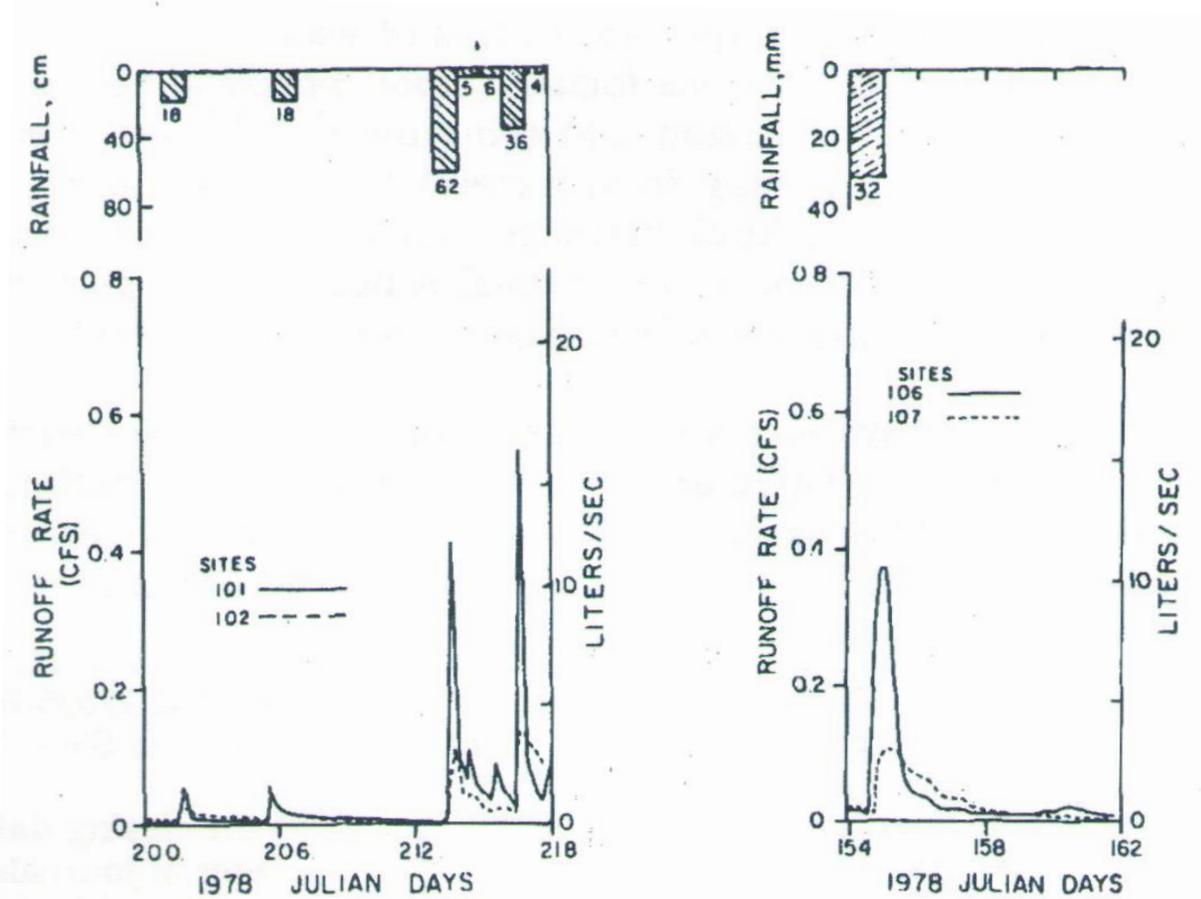


Figura 31. Comparación de hidrogramas de escurrimiento para sitios desarrollados (sitios 101, 106), no desarrollados (102, 107), suelos minerales (sitios 101, 102) y orgánicos superficiales (sitios 106, 107).
Fuente: Guilliam *et al.* (1986)

7.3. Efectos en el transporte de sedimentos y nutrientes

En el estudio de Guilliam *et al.* (1986), se presenta el efecto sobre el N y P drenado, resultado de un cambio de un bosque no manejado y la producción de cultivos de hilera en un suelo pobremente drenado como se muestra en el cuadro 8.

Un suelo con drenaje interior pobre y alto contenido de materia orgánica, conduce a la denitrificación. Por lo tanto, hubo pérdidas anuales de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el agua drenada de ambos sitios desarrollados, incluso, estas pérdidas fueron de 7 a 10 veces más grandes que las pérdidas en los sitios no desarrollados. La magnitud del incremento de la pérdida de fósforo dependió del tipo de suelo, siendo mayor la pérdida en los terrenos cultivados.

Cuadro 8. Eflujo anual de Nitrógeno y Fósforo de suelos cultivados, no desarrollados (Pinos) mineral y orgánico superficial (promedio de tres años)

Mineral soil (1)	Shallow organic (2)	Nutrient (kg ha ⁻¹)			
		NO ₃ -N (3)	NH ₄ -N (4)	Total N (5)	Total P (6)
Cropped	—	4.1	3.7	15.2	0.5
Forest	—	0.4	0.6	3.6	0.2
—	Cropped	1.5	1.6	16.0	7.6
—	Forest	0.2	0.9	5.7	0.2

Fuente: Guillian *et al.* (1986)

Otras investigaciones han observado o predicho un cambio en la composición química del agua drenada, cuando la distribución proporcional entre drenaje subterráneo y superficial es cambiada. En general, entre mejor es el drenaje subterráneo más NO₃-N y N total se pierde y menos P se presenta en el agua drenada. Las pérdidas de estas sustancias pueden representar problemas ecológicos. Esto se muestra en el cuadro 9, con datos de tres suelos similares. El campo I es un suelo inorgánico desarrollado donde el drenaje es esencialmente superficial. El campo II, tiene el mismo diseño de drenaje con zanjas abiertas localizadas aproximadamente 100 metros de separación, tiene la característica de contar con una capa de arena en el perfil del suelo a una profundidad de aproximadamente 1 metro. Esta capa de arena mejora el drenaje subterráneo natural hacia las zanjas abiertas. El campo III, tiene zanjas con espaciamientos a cada 10 metros, pero también cuenta con 2 drenes enterrados paralelos a las zanjas. Así, esencialmente toda el agua drenada del campo I, llega a las zanjas vía flujo superficial, mientras que lo opuesto ocurre en el campo III, y en el campo II, se tiene una condición intermedia entre el campo I y el III.

Cuadro 9. Efecto del drenaje subterráneo en el eflujo de nitratos y fósforos de tres suelos similares cultivados en Carolina del Norte.

Field (1)	Nutrient (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		
	NO ₃ -N (2)	Total N (3)	Total P (4)
I	3.7	13.6	0.53
II	15.7	20.0	0.33
III	32.4	42.1	0.21

Fuente: Guillian *et al.* (1986)

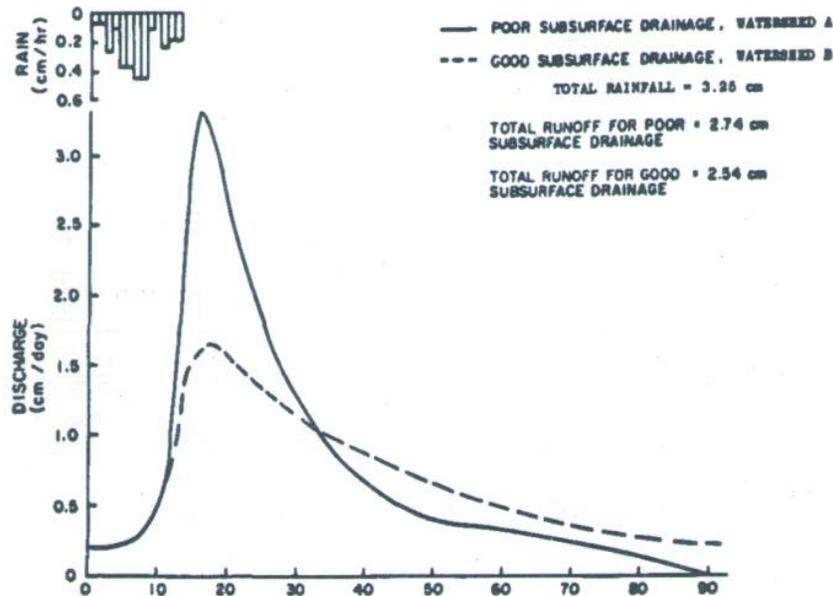


Figura 32. Hidrograma de escurrimiento para una lluvia de 3.25 cm ocurrida el 28 de febrero de 1983; el pico para cuenca A con drenaje subterráneo pobre fue más de dos veces mayor que el de la cuenca B, la cual tiene un drenaje subterráneo bueno. Fuente: Guillian *et al.* (1986)

Un ejemplo del buen efecto del drenaje subterráneo en las descargas se muestra en la figura 32. En esta figura se observan los hidrógrafo del escurrimiento de dos cuencas adyacentes (A y B), esencialmente planas (pendientes menos que 0.02%) y están compuestas por suelos superficiales orgánicos y minerales. Lo único que las diferencia, es que la cuenca A tiene un convencional sistema de drenaje superficial con zanjas abiertas con una separación de 100 m, mientras que la cuenca B tiene dos drenes subterráneos adicionales, y con igual espaciamiento entre las zanjas. La tasa del flujo pico en la cuenca B, con drenaje subterráneo, fue aproximadamente la mitad de la medida en la cuenca A. Sin embargo, el evento del flujo se extendió sobre un largo periodo de tiempo y el flujo total fue aproximadamente el mismo para ambas cuencas, pero el drenaje subterráneo redujo el pico de la tasa de flujo.

Los resultados de varios estudios muestran claramente que el diseño del sistema de drenaje afecta significativamente la proporción y tasa del escurrimiento superficial. Esto implica un efecto potencial sobre la erosión y movimiento de contaminantes a través de las aguas del drenaje superficial y subterráneo de los normalmente suelos pobremente drenados.

El agua degradada drenada tiene el potencial de crear significativos impactos negativos al medio ambiente, como resultado del transporte de nutrientes (N, P), herbicidas, pesticidas, sedimento, elementos tóxicos (B, Se, As) tanto en el flujo del drenaje superficial como en el del subterráneo. En áreas húmedas, el transporte de nitrato y fósforo crea una significativa degradación ambiental en aguas superficiales debido a la eutrofización e hipoxia (Ayars y Evans, 2015)

Acevedo et al (2002), reportaron el efecto del espaciamiento entre los drenes subterráneos en la descarga del N-NO_3^- y N-NH_4^+ en la zona tropical húmeda de Tabasco durante los periodos seco (con riego) y húmedo (de temporal). Esta descarga fue mayor cuando el espaciamiento entre drenes fue menor. Sin embargo la pérdida de N-NO_3^- y N-NH_4^+ a través del drenaje con menor espaciamiento (10 m) fue 14.3 kg ha^{-1} , cantidad no significativa en comparación con la dosis del fertilizante nitrogenado aplicada (240 kg ha^{-1} en los dos ciclos de cultivo con sorgo). La cantidad absorbida por el cultivo fue 64.8 kg ha^{-1} y el resto (160.9 kg ha^{-1}) se perdió por otras vías o incrementó las reservas del suelo. Las concentraciones máximas instantáneas de nitratos observadas en las aguas de descarga de drenes no dependieron del espaciamiento entre ellos y no superaron los valores permisibles. En el cultivo con riego fue mayor la salida de N-NO_3^- y N-NH_4^+ hacia el acuífero semiconfinado, y con el cultivo con temporal fue mayor la salida hacia los cuerpos de agua superficiales por la descarga de drenaje subterráneo. En la época de sequía los riegos incrementaron la concentración de nitratos en las aguas del manto freático, y en la época de lluvias se presentó un efecto de dilución debido a bajas concentraciones de nitratos en el suelo y a las altas precipitaciones.

En general, el agua del drenaje superficial, contiene altas concentraciones de sedimento y constituyentes de fertilizantes, tales como nitrógeno orgánico y fósforo. El agua del drenaje subterráneo, típicamente contiene sedimento muy pequeño, pero con altas concentraciones de constituyentes solubles, como el nitrato. En la figura 33, se muestra que con respecto a un suelo con condiciones naturales, el nitrógeno transportado es dos veces mayor en condiciones de drenaje superficial convencional y 6 veces más, en condiciones de drenaje subterráneo convencional (Evans et al., 1995).

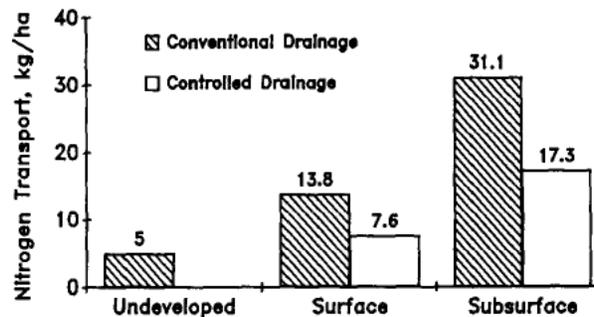


Figura 33. Nitrógeno total transportado anualmente en las aguas drenadas de 14 sitios en Carolina del Norte (Evans et al., 1991)

En la figura 34 se observa el comportamiento del fósforo transportado en las aguas drenadas. Cuando se utiliza el drenaje superficial convencional, la cantidad de fósforo transportado es el doble con respecto a un suelo en condiciones naturales. En cuanto al drenaje subterráneo convencional, este tiene el mismo efecto que el suelo con condiciones naturales. El incremento en el transporte de nitrógeno y fósforo en el agua drenada es principalmente debido a la adición de fertilizantes al suelo.

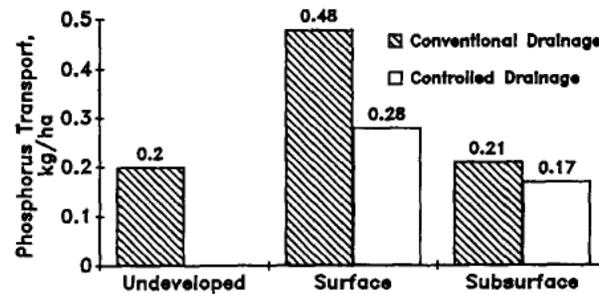


Figura 34. Fósforo total transportado anualmente en las aguas drenadas de 14 sitios en Carolina del Norte (Evans et al., 1991)

7.4. Transporte de pesticidas

Los pesticidas se han detectado en los efluentes del drenaje superficial y subterráneo. La atrazina y el alacloro (pesticidas) han sido detectados en los efluentes del drenaje superficial y subterráneo, en concentraciones que exceden el nivel máximo recomendado por la EPA (Environmental Protection Agency). Las concentraciones de los pesticidas estudiados han sido varias veces más altos en los efluentes de los sistemas de drenaje superficial que en los sistemas subterráneos. Los pesticidas recuperados de los efluentes representaron típicamente menos del 0.1% de la cantidad aplicada, y la mayoría de las cantidades se encontraron dentro de los 30 días después de la aplicación del pesticida. La aparición de grandes cantidades de pesticidas en el agua drenada, se asocia con intensas lluvias y escurrimientos, cercanos al periodo de aplicación del pesticida.

7.5. Impacto del drenaje en la calidad del agua superficial

Los efluentes, ya sean del drenaje superficial o subterráneo, eventualmente llegan a los sistemas de aguas superficiales. Algunos estudios muestran que los periodos altos de gastos drenados, reducen la salinidad de los tributarios estuarinos, y algunas veces resultando en estrés, enfermedad o decaídas de la producción de ciertas especies pelágicas.

Los niveles de nitrógeno y fósforo en muchos ríos, corrientes, y estuarios, afectan fuertemente el muy delicado balance que existe entre especies indeseables (algas) y las deseables. La agricultura contribuye en más del 50% del sedimento y nutrientes que llegan hasta las aguas superficiales en Carolina del Norte (Evans et al., 1991).

7.6. Efecto del drenaje controlado

Vertedores u otro tipo de estructuras de control ubicados en el dren colector, pueden ser usados para incrementar tanto la eficiencia de utilización del agua de lluvia por el cultivo como para reducir el efluente de nutrientes, particularmente el nitrógeno, en el agua drenada.

Guilliam et al., 1986, utilizando datos de pérdidas de nutrientes obtenidos de mucho experimentos de campo, y usando DRAINMOD para predecir en el drenaje superficial y subterráneo los volúmenes y nutrientes que salen del sistema, para diferentes suelos, se simularon varias combinaciones de drenaje superficial y subterráneo así como de sistemas de drenaje convencional y controlado. Se introdujo al modelo un periodo de 20 años de registros climatológicos.

En el cuadro 10, se muestran los datos para un sistema de drenaje superficial y subterráneo en buenas condiciones. El control de drenaje en los dos suelos experimentales durante el invierno y la mayor parte de la estación de crecimiento fue pronosticado y resultó en 2 cm menos de escurrimiento o 2 cm más de evapotranspiración.

Cuadro 10. Drenaje anual pronosticado, utilizando drenaje convencional y controlado en dos suelos.

Soil (1)	Conventional Drainage (cm)			Controlled Drainage (cm)		
	Surface (2)	Subsurface (3)	Total (4)	Surface (5)	Subsurface (6)	Total (7)
Portsmouth	1.7	14.5	16.2	4.5	10.3	14.8
Wasda	2.1	12.5	14.6	3.9	9.6	13.5

El drenaje controlado afecta el flujo de salida de nitratos en el agua drenada en dos formas. Primero, los suelos permaneces húmedos, lo cual promueve la denitrificación y disminuye la concentración de nitratos en el del drenaje subterráneo. La predicción del control del drenaje para los dos suelos es un 32% de aumento en el NO₃-N efluente (Cuadro 11). La disminución en NO₃ efluente bajo drenaje controlado es acompañado por un incremento en el efluente de nitrógeno orgánico debido al incremento en la pérdida de sedimentos. Sin embargo, el incremento en la pérdida de N orgánico es mucho menor que la disminución en NO₃-N, así que el drenaje controlado disminuye la pérdida de N total. La pérdida es más grande en el drenaje controlado del P total.

Cuadro 11. Eflujo anual de nutrientes pronosticado, utilizando drenaje convencional y controlado en dos suelos.

Soil (1)	Conventional Drainage (kg ha ⁻¹)			Controlled Drainage (kg ha ⁻¹)		
	NO ₃ -N (2)	Total N (3)	Total P (4)	NO ₃ -N (5)	Total N (6)	Total P (7)
Portsmouth	39.1	44.4	0.05	26.4	31.2	0.16
Wasda	27.8	33.2	0.18	19.1	22.5	0.28

Con respecto al tema, Evans et al. (1995), mencionan que el drenaje agrícola usualmente incrementa el gasto drenado anual de los campos. Estudios realizados en Carolina del Norte, muestran que el incremento promedio es menor al 10%, comparado con sitios en



condiciones naturales (no desarrollados). En la siguiente figura, se observa que con respecto a los sitios no desarrollados, el agua de drenaje es mayor en 5%, cuando el sitio tiene drenaje superficial y un 20% con drenaje subterráneo (convencional en los dos casos). Se observa también, que cuando se utiliza el drenaje subterráneo controlado, el agua drenada disminuye.

El drenaje controlado es una técnica en la cual una estructura es usada para manejar el nivel del agua en la salida del dren, esto puede reducir el agua drenada total en aproximadamente un 30%, cuando se maneja todo el año, comparado sistema convencional de drenaje.

El efecto del drenaje controlado en gastos picos varía estacionalmente. Durante el periodo seco, el drenaje controlado típicamente reduce los picos, algunas veces los elimina, en algunas tormentas. Durante los periodos húmedos, el drenaje puede tener poco o nulo efecto y en algunos casos, incluso puede incrementar los picos.

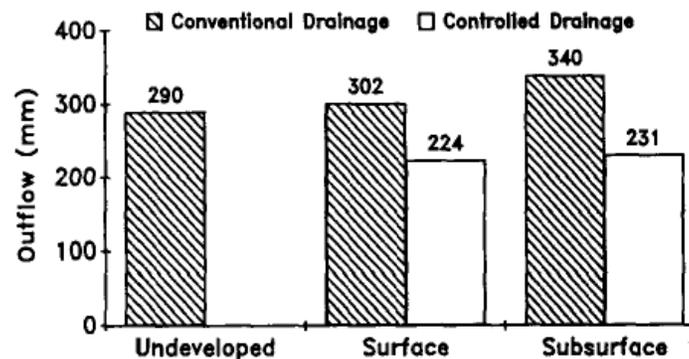


Figura 35. Mediciones de descarga del drenaje en 14 sitios de Carolina del Norte

Fuente: Evans et al. (1995).

En algunos casos, las concentraciones de nitrógeno (nitratos) han sido de 10 a 20% más bajas en las aguas drenadas en sistemas controlados, comparado con el convencional drenaje. La reducción de Nitratos ha sido atribuida a las altas tasas de denitrificación, idea que se ha asociado con los altos niveles freáticos. El drenaje controlado tiende a disminuir la concentración de fósforo, predominantemente en el escurrimiento superficial, pero tiene el efecto puesto en los sistemas subterráneos (Evans et al., 1995).

El drenaje controlado ha mostrado significativas reducciones en el transporte de nitrógeno y fósforos. Las concentraciones del nitrógeno total, en los efluentes de los drenes, han sido aproximadamente iguales, independientemente de la estrategia de control. La reducción de las masas del nitrógeno y del fósforo en el agua drenada se debió principalmente por la reducción en el volumen drenado. El drenaje controlado reduce el transporte anual de nitrógeno total ($\text{NO}_3\text{-N}$ y TNK) en el agua drenada en aproximadamente 45% en estudios hechos en Carolina del Norte. El drenaje controlado reduce el transporte de fósforo en el escurrimiento superficial en aproximadamente 40%,

pero tiene un pequeño efecto en el transporte en el flujo subterráneo. El transporte de fósforo fue relativamente bajo (<0.5 kg/ha/año) para todas las estrategias de drenaje (superficial, subterráneo, controlado y no controlado).

Se ha observado un 25% de incremento en el transporte del pesticida aldicarb en el agua drenada de los sistemas controlados, comparado con el drenaje convencional (figura 36). Sin embargo, en ambos tratamientos, el pesticida total recuperado solo representó el 0.05% del total aplicado. Se han observado bajas concentraciones de Prometryn y Atrazina en la solución del suelo, en drenaje controlado, comparado con el drenaje convencional. Se supone que el control del manto freático desacelera la lixiviación vertical de estos pesticidas hacia el agua subterránea.

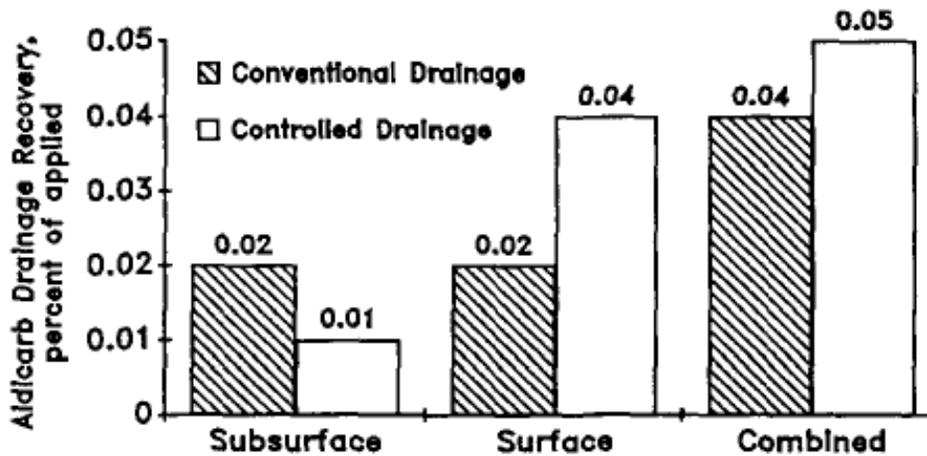


Figura 36. Transporte de Aldicarb en el agua drenada influenciado por el tipo de sistema de drenaje y por la estructura de control.

Fuente: Evans, et al. (1995).

7.7. Impacto potencial del drenaje controlado en la calidad del agua superficial

De las aproximadamente 28,000,000 ha de parcelas drenadas en regiones húmedas de Estados Unidos, aproximadamente el 30% (8,500,00 ha), se estima que tiene potencial para la adopción y aplicación de prácticas de drenaje controlado (Cuadro 12).

Cuadro 12. Estatus del drenaje convencional y controlado en estados con regiones húmedas con más del 1% del área total de tierras drenadas (Evans et al., 1995).

State ^a (1)	Total cropland ^{b,d} (ha) (2)	Drained cropland ^{c,d} (ha) (3)	Cropland with potential for controlled drainage ^e (ha) (4)	Cropland with controlled drainage installed ^e (ha) (5)
Illinois	10,011,000	3,569,000	400,000	2,000
Indiana	5,579,000	2,782,000	600,000	1,200
Iowa	10,705,000	2,834,000	400,000	8,000
Ohio	5,039,000	2,397,000	1,100,000	100
Arkansas	3,280,000	2,151,000	160,000	400
Louisiana	2,595,000	1,562,000	500,000	400
Minnesota	9,321,000	1,934,000	610,000	400
Florida	1,440,000	1,146,000	1,000,000	610,000
Mississippi	3,002,000	1,440,000	1,000,000	60,000
Texas	13,490,000	1,283,000	225,000	0
Michigan	3,823,000	1,563,000	80,000	12,000
North Carolina	2,710,000	984,000	500,000	100,000
Missouri	6,072,000	1,202,000	850,000	0
North Dakota	10,947,000	910,000	10,000	2,000
Wisconsin	4,638,000	409,000	325,000	800
South Carolina	1,449,000	426,000	175,000	1,200
Georgia	2,659,000	219,000	80,000	200
Maryland	726,000	367,000	200,000	600
Tennessee	2,264,000	256,000	120,000	00
New York	2,394,000	333,000	40,000	100
Delaware	210,000	130,000	100,000	800
Total	102,356,000	27,868,000	8,475,000	800,200

En estudios hechos en Carolina del Norte, el drenaje controlado reduce el transporte de hidrógeno en el agua drenada en aproximadamente 10kg/ha/año en promedio. Extrapolando este resultado al total de área cultivada actualmente usando drenaje controlado, un estimado de 8,000,000 kg de N no llegarían a las aguas superficiales debido al drenaje. Con la total implementación del drenaje controlado a áreas que son físicamente adecuadas, la carga de nitrógeno a las aguas puede potencialmente ser reducidas en aproximadamente 100,000,000 kg anualmente.

7.8. Efectos en la salud de los humanos

Los sistemas de drenaje subterráneo son estudiados principalmente por su contribución a la contaminación de las aguas, pues algunos de los agroquímicos que se lixivian más allá de la zona de raíces, llegan al agua de drenaje que descarga en las corrientes y cuerpos de agua locales. Los nitratos pueden producir enfermedades, como la metahemoglobinemia y cáncer gástrico, desórdenes de salud tales como el linfoma de Hodgkin, incremento en la mortalidad infantil, defectos en el sistema nervioso central e hipertensión. Por lo anterior, la Organización Mundial de la Salud (WHO) estableció en 1971 la concentración de 10 mgL^{-1} de N-NO_3^- o 44.5 mg L^{-1} de NO_3^- como límite máximo en el agua para consumo humano (Acevedo *et al.*, 2002).

7.9. Tratamiento y disposición del agua drenada

En áreas húmedas la carga de N y los pesticidas y herbicidas son los principales contaminantes. Tratamientos en los puntos de descarga con reactores en la línea biológica acoplados con controles de flujo, se empiezan a evaluar para reducir la carga de N en el agua drenada. Las opciones de tratamiento pueden incluir el uso de humedales y zanjas con vegetación en el punto de descarga para reducir el N mediante el consumo de las plantas y la volatilización y desnitrificación (Ayars y Evans, 2015).

Se han presentado estrategias para mezclar agua salina drenada con agua con baja salinidad para reducir la salinidad y hacerla adecuada para el riego o alternado el agua salina y el agua de buena calidad para el riego. La opción seleccionada dependerá de la disponibilidad del agua a suministrar, tolerancia del cultivo a la salinidad y de la habilidad de manejar el agua aplicada.

7.10. Cambio climático

El sector agrícola es uno de los más vulnerables al cambio climático debido a su alta dependencia del clima y de los elementos del tiempo. Según la última evaluación del IPCC, el impacto de los cambios observados en las tendencias del clima, la variabilidad y los fenómenos extremos, muestran que los rendimientos de los cultivos en muchos países han disminuido, en parte debido al aumento de las temperaturas y a los fenómenos meteorológicos extremos. La mayoría de los estudios concluyen que los impactos del cambio climático serán sustanciales, especialmente para los países en desarrollo, debido a su ubicación geográfica y porque las poblaciones rurales sufren de capacidades bajas de adaptación (Tyagi y Avinash, 2014).

En el 22 Congreso de la International Commission on Irrigation & Drainage (ICID), celebrado del 14 al 20 septiembre 2014 en Gwangju, Corea del Sur, se discutieron varios temas acerca de cómo pueden el riego y drenaje jugar un papel importante en la adaptación al cambio climático (Tyagi y Avinash, 2014). Las principales conclusiones se presentan a continuación:

1. El cambio climático es un estrés adicional sobre las cuestiones cada vez más complejas e interrelacionadas de desarrollo rural. Las intervenciones para mitigar los impactos extremos del cambio climático, como inundaciones y sequías tienen que integrarse en todos los procesos de toma de decisiones.
2. El riego y drenaje son estrategias de adaptación importantes, que proporcionan los medios para mitigar los impactos negativos del cambio climático para la seguridad alimentaria y del agua.
3. Para mitigar el efecto del cambio climático sobre el uso del agua en la agricultura, es necesaria la instalación de equipos de medición de agua en proyectos de riego, la modernización de los sistemas de riego actuales, y el aliento de las personas, así como las partes interesadas pertinentes (cooperativas de riego, las ONG, etc.), lo que lleva al desarrollo sostenible en el uso del agua de riego.
4. Deberá haber más esfuerzos para hacer frente a los riesgos de inundación y sequía en la agricultura a nivel de políticas, con la integración adecuada de políticas, planes y programas.
5. Los impactos negativos del cambio climático en los rendimientos de los cultivos se han vuelto más común que los positivos. Los problemas exactos no están bien definidos en las regiones menos desarrolladas con disponibilidad de agua limitada, donde la vulnerabilidad al cambio climático es mayor. Por lo tanto, es necesario establecer medidas eficaces, evaluar las condiciones pasadas y presentes, con innovaciones en la metodología y tecnologías del estado de la técnica.
6. Mientras se proyectan impactos del cambio climático en los sistemas atmosféricos e hidrológicos en la producción de alimentos, los impactos sobre los cultivos, incluso en los principales cereales, están aún en evaluación inicial. Los impactos del cambio climático en los procesos agrícolas e hidrológicas, incluyendo el perfil de suelo-agua, la dinámica de las aguas subterráneas, el caudal del río, las necesidades de agua, el crecimiento de los cultivos, la descarga del drenaje, la calidad del agua, el patrón de cultivo y sistema de explotación, etc., deben ser evaluados y se debe promover la implementación de los resultados.
7. Dado que los fenómenos o los factores asociados con el cambio climático y sus impactos aparentes son difíciles de proyectar con certeza, una de las medidas más eficaces y viables para la adaptación a los impactos es tomar acciones de forma incremental, como en una forma de adaptación/ensayo y error, utilizando la mejor experiencia pasada disponible y el conocimiento actual, mientras sea necesaria la recolección de información adicional. En la consecución de este enfoque adaptativo, una evaluación por pasos, es eficaz y fiable.

8. Aspectos económicos

8.1. Consideraciones económicas de los sistemas de drenaje

La justificación de los sistemas de drenaje es el aumento de la productividad agrícola conservando el medio ambiente. Desde el punto de vista económico son preferibles los sistemas que tienen un costo mínimo, es decir, que son menos complicados. Sin embargo, desde el punto de vista de conservación del medio ambiente, los sistemas de drenaje deben contar con los medios que les permitan mantener la fertilidad de los suelos, evitando en lo posible la contaminación de las aguas y el empeoramiento de las condiciones de drenaje de terrenos más bajos. Estos requerimientos en cierta forma se contraponen con el objetivo de maximizar las inversiones, sobre todo en el corto plazo, por esto es indispensable realizar estudios de pronóstico de los cambios de las condiciones naturales, de los cambios de la productividad agrícola y optimizar los parámetros de la red de drenaje. La finalidad de la optimización es encontrar una solución que satisfaga los diferentes requerimientos de los cultivos y del cuidado de la naturaleza tomando en cuenta las condiciones naturales de la zona donde se planea su construcción.

El sistema de drenaje debe no solamente responder a los requerimientos de los cultivos en cuanto a regulación del régimen de humedad del suelo, sino también dar un resultado económico favorable de la producción agrícola. Para esto es necesario pronosticar los cambios posibles del medio ambiente (cambios de hidrograma del escurrimiento de los ríos, así como de las condiciones hidrogeológicas en los territorios adyacentes), es indispensable anticipar las medidas requeridas para el cuidado del medio ambiente. Esto frecuentemente aumenta el costo de los sistemas de drenaje (COLPOS, 1989).

8.2. Exigencias económicas en lo que respecta al riego de los suelos

Desde el punto de vista de la producción agrícola se da preferencia a los sistemas de riego, cuyo costo es mínimo (y esto significa los sistemas de riego más sencillos) y que permiten obtener un máximo de utilidad. Desde el punto de vista de conservación del medio ambiente, los sistemas de riego deben ser lo más desarrollado posibles en su construcción (entonces significa que no son muy sencillos y frecuentemente son muy complejos y caros) para prevenir el deslave de los suelos, la contaminación de las aguas y la acción negativa en los territorios adyacentes. Todas estas exigencias en lo que se refiere a los aspectos económicos son contradictorias. Por eso es necesario el pronóstico de los cambios del medio ambiente, pronóstico de la cosecha, y una optimización de los parámetros de los sistemas de riego.

9. Lineamientos para establecer un experimento donde sea posible evaluar el aporte del agua freática al requerimiento de riego de un cultivo

Un objetivo de esta revisión fue el presentar una metodología para determinar si el uso del agua de los cultivos de las aguas subterráneas poco profundas es una opción de gestión del agua adecuada para un sitio en particular y para ayudar en la consideración de alternativas de manejo. Se presenta la propuesta de Ayars et al. (2006). La metodología consiste en un análisis de las condiciones del suelo y de agua existentes en el contexto de los patrones de cultivo propuestos. Los datos que se describen en el cuadro 13, se utilizan para analizar la viabilidad del uso de las aguas subterráneas poco profundas como el suministro de agua suplementaria y para seleccionar los cultivos y gestión adecuados.

Cuadro 13. Datos necesarios para caracterizar la aplicabilidad del patrón de cultivo para un uso in-situ de agua subterránea por los cultivos

Agua subterránea - La salinidad, concentración de boro, la fuente de las aguas subterráneas (percolación profunda, de flujo lateral), la profundidad inicial y final de las aguas subterráneas, y tasa de cambio, profundidad media del agua subterránea.
Cultivos - Anuales, perennes, tolerancia a la sal, requerimiento total de agua (ETc), días a madurez, período de crecimiento total, respuesta al estrés de la sequía o estrés de oxígeno, profundidad de enraizamiento, días a la máxima profundidad de enraizamiento, período total de crecimiento del cultivo, anual, perene, fibroso.
Sistema de riego y gestión - Tipo de sistema, frecuencia de riego, lámina de riego, la calidad del agua de riego.
Sistema de Drenaje - Presencia del sistema de drenaje, configuración (profundidad de laterales, separación lateral, posición lateral con respecto a la superficie), gravedad, bombeo.
Tipo de suelo - Arcilloso, franco, franco arcilloso limoso, etc.

Fueron desarrollados cocientes utilizando datos del cultivo, suelo, y agua para guiar la evaluación de un patrón de cultivo para un sitio dado. Estos fueron desarrollados en base a la experiencia de la literatura y de campo y se resumen en el cuadro 14. La importancia de un cociente individual tendrá que ser ponderado como un factor en el proceso de toma de decisiones.

Cuadro 14. Parámetros usados para evaluar la aplicabilidad del sitio para el uso del agua subterránea de los cultivos in-situ.

Cociente	Valor
EC (agua subterránea)/Umbral Maas-Hoffman de la pérdida de rendimiento	≤ 2
Días a la madurez/Periodo total de crecimiento	<0.5
Máxima profundidad de enraizamiento/Profundidad media del nivel freático (parte superior de la franja capilar)	>0.5
Profundidad efectiva de extracción/ Profundidad del nivel freático cuando se usa el cociente de la ecuación de Meyer Z_r/Z_{max}	<0.4

El objetivo es seleccionar un cultivo que tenga un período prolongado de tiempo para utilizar el agua subterránea poco profunda. Esto requerirá que la zona radicular esté cercana al manto freático por un período prolongado y que el crecimiento de los cultivos no sea limitado por la salinidad. Esto da lugar a las siguientes relaciones, empezando con la selección de cultivos. La relación de la CE del agua subterránea al umbral Maas-Hoffman para la reducción del rendimiento debe ser ≤ 2 . Esto coincidirá con la tolerancia a la salinidad de la planta a la CE del agua subterránea para maximizar el uso potencial. El número de días para el desarrollo máximo de la raíz entre el número total del periodo de crecimiento, debe ser <0.5 . Esto maximizará el tiempo de oportunidad para que el cultivo utilice el agua subterránea poco profunda. La profundidad máxima de enraizamiento dividida por la profundidad media del manto freático (parte superior de la franja capilar) debe ser > 0.5 . La profundidad de extracción de agua efectiva, dividida por la profundidad del nivel freático debe ser <0.4 , si se utiliza la relación de la ecuación Meyer Z_r/Z_{max} . Esto posicionará la zona de las raíces cerca del nivel freático y maximiza el potencial de flujo.

El uso de agua subterránea superficial es afectado por la profundidad del agua subterránea, calidad del agua, etapa de crecimiento del cultivo, tolerancia a la salinidad del cultivo, frecuencia de riego y lámina aplicada, y si el cultivo es anual o perene, este nivel de complejidad hace esto imposible para conducir experimentos que cubran todos los factores de un solo experimento y la investigación sería enfocada solamente en único componente, por ejemplo, el uso del agua con respecto al profundidad del nivel freático, o la calidad del agua subterránea, o el tipo de suelo (Ayars et al., 2006).

Como resultado, mucha de la literatura cuantifica la cantidad de agua usada para las condiciones existentes del experimento, pero provee poca información de como extender esta información a otras situaciones.

Encontrar sitios que sean adecuados para este tipo de investigación es un problema. Un sitio ideal es uno que tenga un manto freático que no fluctúe o que se pueda controlar, que tenga un suelo que no sea salino, y lo suficientemente grande como para ser representativo de la zona. Lisímetros, de pesada y drenaje, también se han utilizado para estudiar el uso del agua de los cultivos de las aguas subterráneas poco profundas. Estudios con lisímetro tienen la ventaja de un buen control sobre la mayoría de las

variables en la ecuación de balance de agua. El nivel freático se controla generalmente a una profundidad fija durante el experimento lo que elimina una variable en la interpretación de los resultados. Los flujos de agua hacia y desde la masa del suelo se pueden medir con precisión. Con un lisímetro de pesada la ET se puede medir con precisión, mientras que se requieren mediciones de agua del suelo para un lisímetro de drenaje. En cualquier caso, se minimiza el efecto de la variabilidad del suelo en el resultado. Sin embargo, los lisímetros son caros de construir y mantener y con frecuencia no son representativos de las condiciones de campo del cultivo.

Se debe tener cuidado para asegurar que el lisímetro esté rodeado de un cultivo que tiene características similares. Si esta no es la situación, entonces el ET no será representativa de la condición de campo.

Lo anterior sería para establecer un experimento donde sea posible evaluar el aporte del agua freática al requerimiento de riego de un cultivo. En una forma más general, se tiene una metodología para diseño y operación de sistemas de drenaje controlado y riego suplementario, la cual se presenta en el informe del proyecto “Incremento de la producción agrícola mediante el control del régimen de humedad del suelo”, elaborado por Lázaro et al., en el año 2011.

El procedimiento seguido para el manejo de régimen de humedad del suelo consistió en:

- 1) Acondicionamiento del módulo experimental

Lo cual consiste en el buen funcionamiento del sistema de riego y drenaje, terrenos nivelados, instalación de estructuras de control del manto freático, instalación de pozos de observación del nivel freático.

- 2) Recopilación y análisis de información climatológica

Con la información obtenida de estaciones meteorológicas convencionales o automatizadas se elaboran climogramas con el propósito de graficar el comportamiento anual de los elementos climáticos más importantes como son la precipitación y la temperatura. Se realizan también balances hídricos en el suelo, con el fin de evaluar la disponibilidad de agua para los cultivos y obtener una primera estimación de las necesidades de riego y drenaje para un cultivo y área determinada.

- 3) Cálculo de calendarios de riego

La programación del riego consiste en determinar los intervalos y láminas de riego (calendario de riego) a fin de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. La información de base la constituye el tipo de cultivo y su evapotranspiración potencial, la precipitación efectiva y el tipo de suelo. La programación del riego generalmente se obtiene mediante un balance de agua en el suelo. Este método considera que la zona de raíces es un depósito donde se almacena el agua de riego y lluvia que es usada por el

cultivo. El riego se aplica cuando la humedad del suelo baja de un cierto nivel sin provocarle déficit a la planta.

4) Necesidades de drenaje

Los niveles freáticos elevados, producto de la lluvia en zonas húmedas o de sobre riegos en zonas áridas o semiáridas, propician condiciones de aireación insuficientes en la zona radicular de los cultivos provocando problemas de oxigenación deficiente, favorecen el aporte de sales por capilaridad del agua freática, aceleran el incremento de la concentración de sales si la percolación es insuficiente para eliminar por lavado las sales aportadas con el agua de riego, propicia el desarrollo de enfermedades, provocan alteración en la población microbiana, entre otras. El diagnóstico de la magnitud de los problemas de drenaje se realiza a través de la observación sistemática de las variaciones espacio temporales de una red de pozos de observación.

5) Preparación del suelo

Esta labor propicia la buena aireación del suelo, remueve la capa del suelo, incorpora la materia orgánica, reduce la incidencia de plagas, incrementa el control de sales, facilita las labores de cultivo, mejora la distribución del agua de riego y de temporal, que finalmente mejora el desarrollo de las plantas.

6) Establecimiento del cultivo

Fecha de siembra

La fecha de siembra es un factor limitante en la producción, porque marca el buen o mal establecimiento de los cultivos y su repercusión a través de su ciclo vegetativo. Las necesidades de agua y temperatura, y las condiciones prevalecientes en la zona de estudio son de vital importancia en la delimitación del período óptimo de siembras. Según los días que tarda en llegar a la floración los cultivos se clasifican en: precoces, intermedios y tardíos. Sin embargo, la floración de un cultivo cambia su comportamiento al cambiar de localidad o al modificarse la fecha de siembra. El cambio se debe a que el crecimiento y desarrollo están influenciados por las condiciones ambientales, siendo las variables de temperatura y fotoperiodo las de mayor importancia.

Los cultivos deben establecerse dentro de las fechas de siembra recomendadas por los centros de investigación o por experiencias del personal de instituciones agrícolas oficiales para lograr un desarrollo óptimo de las plantas.

Densidad de siembra

La densidad de siembra, kilos de semilla por hectárea o cantidad de plantas por metro lineal o por hectárea, está en relación directa con la distancias entre surcos y entre plantas, y corresponde a la máxima población de plantas que puede desarrollarse

óptimamente, sin que exista disminución en el rendimiento por competencia de agua y nutrientes en el suelo y luz solar en el área foliar. Es conveniente realizar una prueba de germinación previo a la siembra para conocer en forma precisa el porcentaje de germinación de la semilla con el fin de incrementar la densidad de población con el porcentaje del faltante de la semilla no germinada.

Método de siembra.

La siembra se puede realizar utilizando sembradoras mecánicas convencionales (semi-precisión) o de precisión. Es recomendable el uso de las sembradoras de precisión para lograr uniformidad en la distribución de las plantas controlando la distancia entre surcos y plantas, y la profundidad de siembra.

7) Análisis químicos de suelo, agua y planta

El análisis químico del suelo, agua y planta, es una fuente de información valiosa para el manejo de suelos y del cultivo, sin embargo, para que un análisis sea útil, es necesario interpretarlo debidamente.

8) Elaboración, adecuación y aplicación del paquete tecnológico del cultivo por establecer

La fertilización es una de las actividades más importantes en el proceso de producción de los cultivos, debido a ello, esta actividad se realiza de acuerdo a cada tipo de suelo, rotación de cultivos, incorporación de residuos de cosecha, rendimiento esperado, entre otros. Los análisis de suelo permiten conocer las necesidades precisas de cada terreno de acuerdo al cultivo.

Con el uso de fertilizantes pueden lograrse incrementos en el rendimiento de más del 20%, siempre y cuando los demás factores que intervienen sean bien manejados (preparación del suelo, variedad, riegos, control de plagas y enfermedades, y control de malezas).

9) Programación de riegos previo ajuste con muestreos de humedad del suelo

Riegos

El número y época de los riegos de auxilio depende de las condiciones de clima, suelo y cultivos. Es de especial cuidado el intervalo de riegos que va desde el inicio de la floración hasta el llenado de grano.

10) Manejo integrado de plagas y enfermedades,

Las plagas son responsables en alto grado de mermas en el rendimiento, su manejo es determinante para lograr una buena producción. Es frecuente encontrar dos tipos de

daños, el directo ocasionado por los insectos al momento de alimentarse, y el indirecto al transmitir enfermedades del tipo viral. El éxito en el manejo de las plagas está en función de la oportunidad en que se utilicen las diferentes medidas de control. Un buen manejo integrado de plagas inicia con el establecimiento del cultivo en las fechas señaladas, mantener libre de malezas al cultivo, bordos y canales para eliminar hospederas de insectos plaga. También es importante monitorear las principales del cultivo, con el fin de determinar el momento de iniciar las acciones de control.

El control integrado es el mejor método para controlar y prevenir daños de las plagas, enfermedades y malas hierbas, las cuales conjuntamente y comúnmente reducen del 20 al 25% de la producción de los cultivos. El control integrado representa la acción conjunta de diferentes métodos a seguir, con el propósito de hacer más económico y efectivo el combate. El combate integrado puede hacerse en los conceptos siguientes: 1) desarrollo de las plantas, 2) biología de los insectos o patógenos, 3) comportamiento de los insectos benéficos y perjudiciales, 4) modo de acción y persistencia de los parasitoides, 5) prácticas culturales y 6) Manejo de poblaciones de plantas.

11) Monitoreo del nivel freático

El monitoreo del comportamiento del nivel freático es el aspecto más importante para conocer la naturaleza y magnitud de los problemas de drenaje. Las fluctuaciones del manto freático tanto en espacio como en tiempo están íntimamente relacionado con el régimen de humedad y aireación que presenta el suelo en el espesor donde se desarrolla el sistema radicular de las plantas. Cuando el agua invade la zona de raíces, el agua desplaza el aire y obstruye el intercambio de gases entre el suelo y el aire. Por consiguiente, el contenido de oxígeno en el suelo se reduce y la materia orgánica no puede descomponerse aeróbicamente y el proceso anaeróbico se pone en marcha. La descomposición anaeróbica produce compuestos orgánicos reducidos que reaccionan con las sustancias minerales del suelo y producen concentraciones tóxicas de iones de manganeso y sulfato ferroso que afectan el desarrollo de la planta.

12) Apertura y cierre de la compuerta de la estructura de control

La apertura y cierre de la estructura de control se debe hacer en función del contenido de humedad en el suelo. El drenaje subterráneo no debería remover el agua que puede contribuir al crecimiento del cultivo, más allá del punto necesario para establecer una adecuada aireación. Los beneficios del manejo activo en áreas húmedas pueden ser el almacenamiento del agua de lluvia para soportar el crecimiento de los cultivos.

10. Conclusiones

Basándose en la literatura revisada, se presentan las siguientes conclusiones, las cuales son expuestas por capítulo.

En el trópico húmedo mexicano, se concentra el 70% de las tierras de mediano y alto potencial agrícola y el 65% de los recursos hidráulicos. En las zonas subhúmedas y en algunas partes de las zonas húmedas, aun cuando la precipitación anual es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos agrícolas generalmente las lluvias se concentran en un período de tiempo muy corto de la estación lluviosa. Esto provoca por un lado problemas de exceso y por el otro, déficit de humedad para los cultivos.

Normalmente los cálculos del régimen de riego no se relacionan con los parámetros de drenaje, lo cual es incorrecto ya que el régimen de riego influye tanto sobre el régimen de humedad del suelo como sobre el régimen del manto freático. Igualmente de los parámetros de drenaje dependen en cierta medida el régimen de riego. Es decir existe una interacción entre los sistemas de riego y drenaje, por lo que al analizarlos es indispensable tomar en cuenta tales interacciones y hacer una optimización conjunta de los parámetros de drenaje y del régimen de riego.

Requerimientos en la regulación del régimen hídrico de los suelos

La acción del drenaje sobre la fertilidad de los suelos es doble. Por un lado, al remover los excesos de agua se generan procesos aeróbicos, las sustancias nutritivas se oxidan y pasan a formas accesibles a las plantas, se acelera la descomposición de la materia orgánica y el suelo se abastece de nuevos elementos nutritivos minerales. aumentando la fertilidad de los suelos. El drenaje frecuentemente conduce a un aumento del régimen de lavado de los suelos. Esto conduce a un cambio de la dirección de proceso de formación de suelos y al aumento de la lixiviación de sustancias minerales hacia las aguas freáticas y hacia los efluentes de drenaje.

Existe una contradicción entre el desarrollo del cultivo y los procesos del suelo. Durante el mejoramiento de los suelos prácticamente no se pueden conjugar las exigencias de los suelos, de la plantas, y de la conservación de la naturaleza con el manejo del régimen hídrico. Por esta razón para obtener un alto rendimiento y conservar un alto nivel de fertilidad de los suelos es indispensable que al proyectar los sistemas de drenaje se busquen las mejores combinaciones entre el régimen hídrico y sistema de medidas agrotécnicas, es decir, es indispensable ligar las medidas agrotécnicas (tipo y composición de cultivos, dosis de fertilizantes, labores culturales, etc.) con los parámetros del sistema de drenaje. Esto es posible solo cuando se puede pronosticar el rendimiento y los cambios de las propiedades de los suelos como consecuencia de los trabajos de drenaje.

El riego y drenaje controlado

Estudios en áreas húmedas demostraron que es posible manejar drenes subterráneos para reducir el flujo y almacenar agua en el suelo para uso agrícola, además que el drenaje controlado ha sido también usado para la subirrigación en áreas húmedas. La subirrigación requiere un conjunto diferente de criterios para facilitar la remoción rápida del agua en casos cuando la lluvia pueda interactuar con la subirrigación. En general, los estudios revisados en este trabajo, en los cuales se utiliza el riego y drenaje controlado, muestran un ahorro de agua, manteniendo el rendimiento y calidad de la producción.

Contribución del agua subterránea superficial al uso consuntivo de los cultivos

La revisión demuestra que para que el uso *in situ* sea factible debe de existir agua subterránea de buena calidad, con relación a la tolerancia a la sal del cultivo y que esté disponible por un periodo extenso de tiempo. El porcentaje de agua extraído del manto freático se reduce a medida que aumenta el contenido de arcilla del suelo. Para un tipo de suelo dado, un aumento en la profundidad del nivel freático, resulta en una reducción del uso de agua del cultivo desde el manto freático. El porcentaje de contribución del agua del suelo disminuye rápidamente a medida que aumenta la salinidad y se requiere el riego para cumplir con el requerimiento de agua del cultivo para mantener el rendimiento. La temporada de crecimiento de los cultivos impactará en el uso total de agua de varias maneras. El desarrollo de un modelo y de su potencial, que den una mejor comprensión del uso del agua subterránea superficial de los cultivos, debe describan el sistema de raíces y su interacción con el agua subterránea. La contribución del agua subterránea aumenta a medida que el nivel de sustitución por parte del riego disminuye. Esto significa que la alta frecuencia de riegos, diaria o casi diaria, reduce el potencial de captación de agua subterránea.

Modelación y simulación

A pesar del desarrollo de sofisticados modelos matemáticos y grandes avances en las computadoras, se han desarrollado muy pocos modelos para diseñar sistemas de drenaje como una parte de un manejo integral del agua en el suelo.

En la clasificación realizada por Skaggs, la cual agrupa a los modelos de simulación en dos tipos. En el primero, se resuelve la ecuación de Richards para el flujo no saturado en la zona por encima del nivel freático y se utilizan ecuaciones de aproximación para el flujo saturado hacia los drenes. En el segundo enfoque se realiza un balance de agua para describir los flujos y el régimen de agua en el suelo por encima del nivel del agua subterránea, y se usa un enfoque analítico para el flujo saturado por debajo del nivel freático. Se concluye que los principales modelos son el, SWATRE y DRAINMOD. El modelo SWATR(E) ejemplifica el primer enfoque y DRAINMOD al segundo.

Aspectos ambientales

El más dramático efecto del desarrollo agrícola de las tierras en la hidrología, es el incremento del gasto pico, cerca de tres veces más altos en los sitios desarrollados con respecto a los no desarrollados.

El agua degradada drenada tiene el potencial de crear significativos impactos negativos al medio ambiente, como resultado del transporte de nutrientes (N, P), herbicidas, pesticidas, sedimento, elementos tóxicos (B, Se, As) tanto en el flujo del drenaje superficial como en el del subterráneo. En áreas húmedas, el transporte de nitrato y fósforo crea una significativa degradación ambiental en aguas superficiales debido a la eutrofización e hipoxia. En general, entre mejor es el drenaje subterráneo más $\text{NO}_3\text{-N}$ y N total se pierde y menos P se presenta en el agua drenada.

Aspectos económicos

El sistema de riego y drenaje debe no solamente responder a los requerimientos de los cultivos en cuanto a regulación del régimen de humedad del suelo, sino también dar un resultado económico favorable de la producción agrícola. Para esto es necesario pronosticar los cambios posibles del medio ambiente (cambios de hidrograma del escurrimiento de los ríos, así como de las condiciones hidrogeológicas en los territorios adyacentes), es indispensable anticipar las medidas requeridas para el cuidado del medio ambiente. Esto frecuentemente aumenta el costo de los sistemas de drenaje.

Lineamientos para establecer un experimento donde sea posible evaluar el aporte de agua freática al requerimiento de riego de un cultivo

Se establecieron los lineamientos para el establecimiento de un experimento donde sea posible evaluar el aporte de agua freática al requerimiento de riego de un cultivo. En general, un sitio ideal sería aquel que presentara un manto freático que no fluctúe o que se pueda controlar, que tenga un suelo que no sea salino, y lo suficientemente grande como para ser representativo de la zona. El cultivo debe tener un período de crecimiento prolongado para que utilice el agua subterránea poco profunda. Esto requerirá que la zona radicular esté cercana al manto freático por un período prolongado y que el crecimiento de los cultivos no sea limitado por la salinidad.

11. Bibliografía

Acevedo, D., Palacios-Vélez, O. L., Nikolskii-Gavrilov, I., Gavi-Reyes, F., Palma-López, D. J., Carrillo-Ávila, E., & Peña-Cabriales, J. J. (2002). Lixiviación de nitrógeno en función del espaciamiento entre drenes subterráneos en tabasco. *AGROCIENCIA*, 36(3), 292.

Acharya, S., y Mylavarapu, R. S. (2015). Modeling shallow water table dynamics under subsurface irrigation and drainage. *Agricultural Water Management*, 149, 166-174.

Ahmad, M. U. D., Bastiaanssen, W. G. M., y Feddes, R. A. (2002). Sustainable use of groundwater for irrigation: a numerical analysis of the subsoil water fluxes. *Irrigation and Drainage*, 51(3), 227-241.

Álvarez, V. M., Martínez, J. M., González-Real, M. M., y Baille, A. (2005). Simulación de la evaporación horaria a partir de datos meteorológicos. *Ingeniería del agua*, 12(1), 39-51.

Ayars, J. E. y Evans, R. G. (2015). Subsurface Drainage—What's Next?. *Irrigation and Drainage*, 64:378-392

Ayars, J. E., Christen, E. W., Soppe, R. W., & Meyer, W. S. (2006). The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review. *Irrigation Science*, 24(3), 147-160.

Ayars, J.E., 1996. Managing irrigation and drainage systems in arid áreas in the presence of shallow groundwater. Case studies. *Irrigation and Drainages Systems*. 10: 227-244.

Ayars, J. E. y Hutmacher, R. B. (1994). Crop coefficients for irrigating cotton in the presence of groundwater. *Irrigation Science*, 15(1), 45-52.

Babajimopoulos, C., A. Panoras, H. Georgoussis, G. Arampatzis, E. Hatzigiannakis and D. Papamichail *Agricultural Water Management*, 2007, vol. 92, issue 3, pages 205-210

Cesanelli, A. y Guarracino, L. (2009). Estimation of actual evapotranspiration by numerical modeling of water flow in the unsaturated zone: a case study in Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology journal*, 17(2), 299-306.

Carlson, D. F., Fredj, E., y Gildor, H. (2014). The annual cycle of vertical mixing and restratification in the Northern Gulf of Eilat/Aqaba (Red Sea) based on high temporal and vertical resolution observations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 84, 1-17.

COLPOS, Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias. (1989). Proyecto: Regulación del régimen de humedad de los suelos con riego y drenaje.

CONAGUA (2011). Estadísticas agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado: Año agrícola 2010.

Contijoch, M. (2003). A Solution and an Opportunity in Mexico. Agriculture & Rural Development Working Paper 12. The World Bank.

Dalton, J. A. (2006). Contribution of upward soil water flux to crop water requirements (Doctoral dissertation, University of Southampton).

Dardanelli, J., y Collino, D. J. (2002). Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas. *Agriscientia*, 19.

Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A. G., y Videla, H. (2006). Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Ciencia del suelo*, 24(1), 29-38.

Dietrich, O., Redetzky, M., & Schwärzel, K. (2007). Wetlands with controlled drainage and sub-irrigation systems—modelling of the water balance. *Hydrological processes*, 21(14), 1814-1828.

Doty, C. W. y Parsons, J. E. (1979). Water requirements and water table variations for a controlled and reversible drainage system. *Trans. ASAE*, 22(3), 532-536.

El-Sadek, A., Feyen, J., y Berlamont, J. (2001). Comparison of models for computing drainage discharge. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 127(6), 363-369.

Evans, R. O., Wayne Skaggs, R., y Wendell Gilliam, J. (1995). Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(4), 271-276.

Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

Guarracino, L., y Cesanelli, A. (2008). Modelado de la evaporación en suelos mediante una condición de borde no lineal en la ecuación de Richards. *Mecánica Computacional*, vol. 27. 337-350.

Gilliam, J. W., y Skaggs, R. W. (1986). Controlled agricultural drainage to maintain water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), 254-263.

IMTA (2006). Los distritos de temporal Tecnificado [video]. Disponible en: http://www.atl.org.mx/index.php?Itemid=543&id=251&option=com_seyret&task=videodirectlink

Lázaro, Ch., Saucedo, R., Namuche, V. y Fragoza, F. (2011). Proyecto: Incremento de la producción agrícola mediante el control del régimen de humedad del suelo. Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Liu Y. y Luo Y., 2011. Effects of shallow water tables on the water use and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under rain-fed condition. *Australian Journal of Crop Science*, 5(13): 1692-1697.

Luo, Y., y Sophocleous, M. (2010). Seasonal groundwater contribution to crop-water use assessed with lysimeter observations and model simulations. *Journal of Hydrology*, 389(3), 325-335.

Mensegue, H. R. V., Degioanni, A. J., y Cisneros, J. M. (2015). Estimating shallow water table contribution to soybean water use in Argentina. *European Scientific Journal*, 11(14).

Nosseto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson y G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research*: 113: 138-148.

Ojeda, W. e Iñiguez, M. (2011). Agricultura y cambio climático en el trópico mexicano. El desarrollo rural del trópico mexicano: memorias, (pp 163-182). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Parsons, J. E., Skaggs, R. W., y Doty, C. W. (1990). Simulation of controlled drainage in open-ditch drainage systems. *Agricultural Water Management*, 18(4), 301-316.

Satchithanatham, S., Krahn, V., Ranjan, R. S., y Sager, S. (2014). Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone. *Agricultural Water Management*, 132, 101-110.

Saucedo, H., Fuentes, C., Zavala, M., y Vauclin, M. (2002). Una solución de elemento finito para la transferencia de agua en un sistema de drenaje agrícola subterráneo. *Ingeniería hidráulica en México*, 17(1), 93-106.

Shao, G., Cui, J., Lu, B., Brian, B. J., Ding, J., & She, D. (2015). Impacts of controlled irrigation and drainage on the yield and physiological attributes of rice. *Agricultural Water Management*, 149, 156-165.

Sie-Tan Chieng, J. K., y Driehuyzen, M. G. (1987). Effects of subsurface drainage and subirrigation on the yields of four crops. *Canadian Agricultural Engineering*, 29(1).

Skaggs, R. W. 1977. Evaluation of drainage-water table control systems using a water management model. In Proc. 3rd Natl. Drainage Symposium, 61-68. ASAE Publication 1-77. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Skaggs, R. W. (2008). DRAINMOD: A simulation model for shallow water table soils. Proceedings of the 2008 South Carolina Water Resources Conference, held October 14-15, 2008 at the Charleston Area Event Center

Stanley, C. D. (2004). Effect of water table depth and irrigation application method on water use for subirrigated fresh market tomato production in Florida. *Journal of soil and water conservation*, 59(4), 149-153.

Tyagi, E., y Avinash, C. (2014). Irrigation and drainage as a tool for climate change adaptation: outcomes of 22nd icid congress. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 709-710.

Torres, J. S., y Hanks, R. J. (1989). Modeling water table contribution to crop evapotranspiration. *Irrigation Science*, 10(4), 265-279.

Wang, X., Hollanders, P.H., Wang S. y Fang S., 2004. Effect of field groundwater table control on water and salinity balance and crop yield in the Qingtongxia Irrigation District, China. *Irrigation and Drainage*, 53: 263-275.

Wruck, S., R. Medina M., y A. Gómez G. (2009). Proyecto: Identificación de las directrices el uso, manejo y aprovechamiento del agua y sus recursos asociados del trópico húmedo mexicano. Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Wu, Y., Liu, T., Paredes, P., Duan, L., y Pereira, L. S. (2015). Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: Evapotranspiration partitioning and capillary rise. *Agricultural Water Management*, 152, 222-232.

Zavala, M., Saucedo, H., y Fuentes, C. (2014). Programa de cómputo para analizar la dinámica del agua en sistemas de drenaje agrícola subterráneo. *Agrociencia*, 48(1), 71-85.

Zavala, M., Saucedo, H., y Fuentes, C. (2012). Sobre la descripción de las transferencias de masa y energía en sistemas de drenaje agrícola con las ecuaciones de Richards y Boussinesq. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4), 27-39.

Zavala, M., Saucedo, H., y Fuentes, C. (2011). Modelo de radiación fractal para el drenaje agrícola basado en las ecuaciones de Richards y Boussinesq. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 141-157.

Zavala, M., Fuentes, C., y Saucedo, H. (2005). Radiación no lineal en la ecuación de Richards bidimensional aplicada al drenaje agrícola subterráneo. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(4), 111-120.