IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

AGUA EN LA AGRICULTURA:
Sostenibilidad y tendencias

Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación A.C.
COMEII

CONTROL DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO EN ZONAS SUBHÚMEDAS

M.I. Erickdel Castillo Solís

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas

II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2016
08 al 10 de septiembre del 2016
Chapingo, México

CONTENIDO

1. Introducción
2. Objetivo
3. Requerimientos en la regulación del régimen hídrico de los suelos
4. El riego y drenaje controlados
5. Contribución del agua subterránea superficial al uso consuntivo de los cultivos
6. Modelación
7. Aspectos ambientales
8. Conclusiones
9. Bibliografía

1. INTRODUCCIÓN

En el trópico húmedo mexicano (Fig. 1), se concentra el 70% de las tierras de mediano y alto potencial agrícola y el 65% de los recursos hidráulicos (IMTA, 2006).

Figura 1. Trópico húmedo

Aun cuando la precipitación anual es suficiente para satisfacer la demanda de agua de los cultivos agrícolas, generalmente no se distribuye a lo largo del año (Fig. 2 y 3).

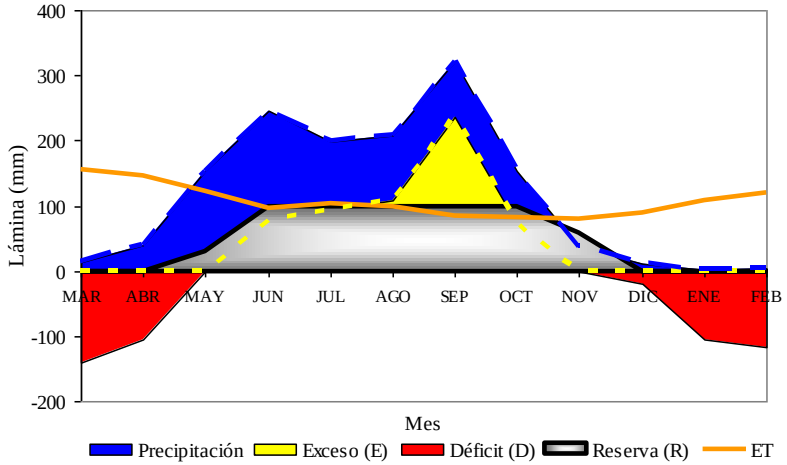


Figura 2. Balance hídrico, Suchiate, Chiapas

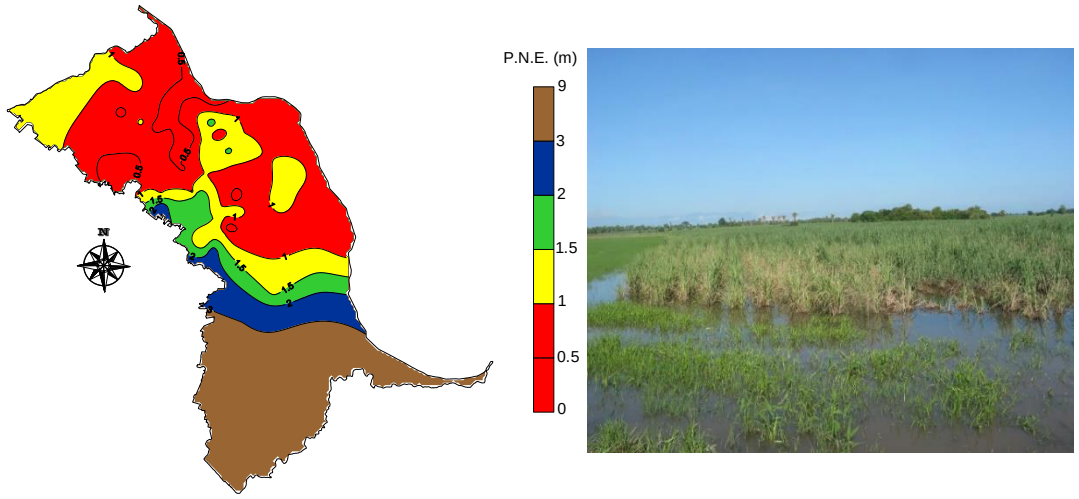


Figura 3. Plano de isobatas del manto freático del DTT Huixlta, Chiapas

Existen 23 DTT (Fig. 4), que en el año agrícola 2010 registraron una superficie sembrada de 1,817,472.5 ha (CONAGUA, 2011), pero se estima que se tiene un potencial de 7.5 millones de ha, en el trópico mexicano (IMTA, 2006) .

Es en la región del trópico húmedo y particularmente en los DTT, en donde se necesita realizar un manejo adecuado del régimen de agua en el suelo, mediante el riego y drenaje controlado.

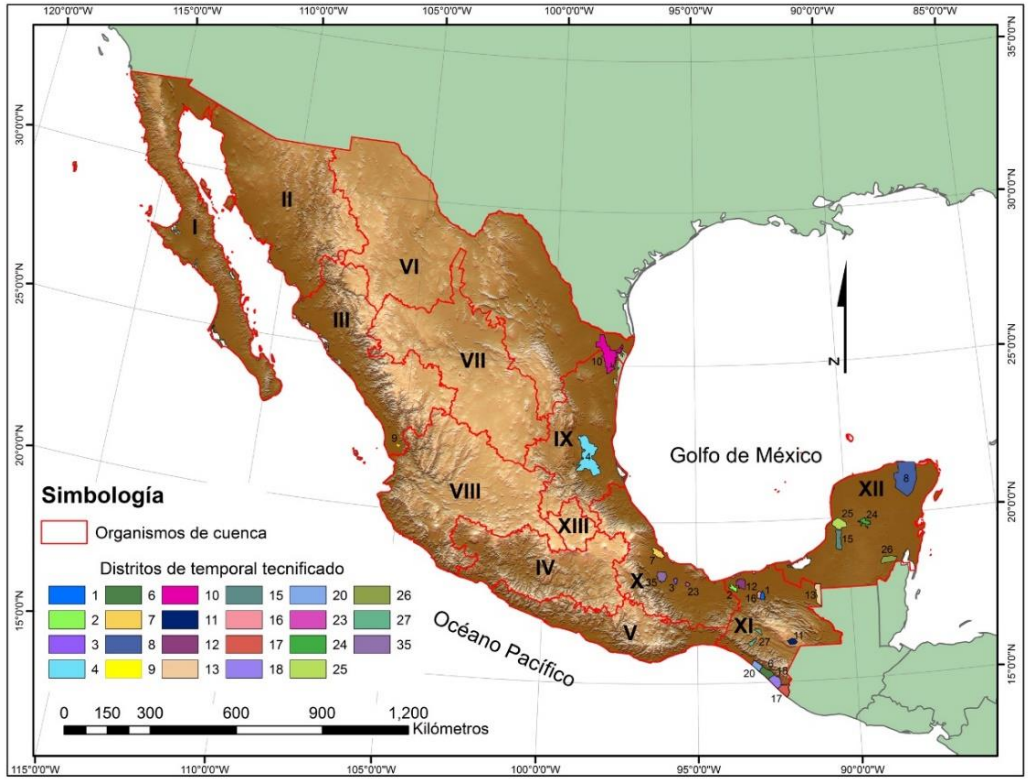


Figura 4. Ubicación de los Distritos de Temporal Tecnificado (CONAGUA 2011)

2. Objetivo

Este trabajo tuvo 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 estudió 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, la evapotranspiración,
el aporte de agua del manto freático superficial y se estudió el caso especial de la subirrigación, utilizando el sistema de drenaje subterráneo controlado (figura 5).

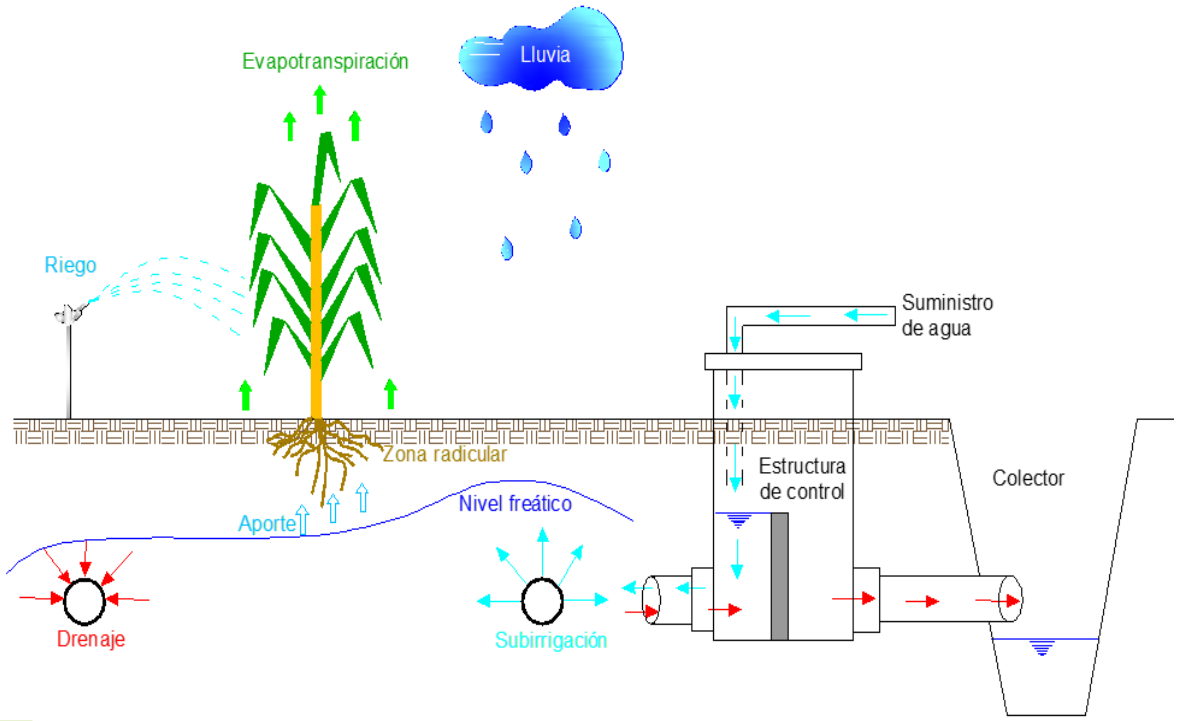


Figura 5. Modelo conceptual del manejo del régimen de humedad en el suelo

3. REQUERIMIENTOS EN LA REGULACIÓN DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD DE LOS SUELOS

Requerimientos de las plantas

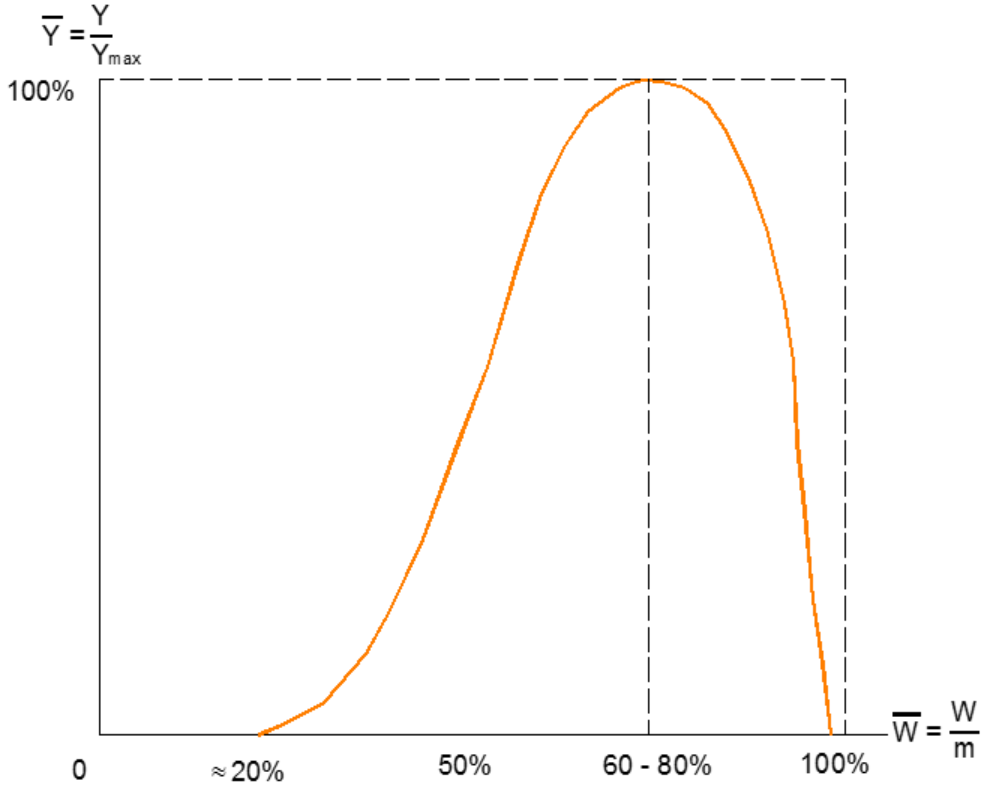


Figura 6. Variación del rendimiento relativo ($\bar{Y}$=Y/Y_{max}), en función de la humedad relativa ($\bar{W}$=W/m). Donde, Y es el rendimiento, Y_{max} es el rendimiento máximo (ambos en unidades de masa entre área), W es el contenido de humedad y m es la porosidad (ambos en porcentaje). Fuente: Palacios,1990.

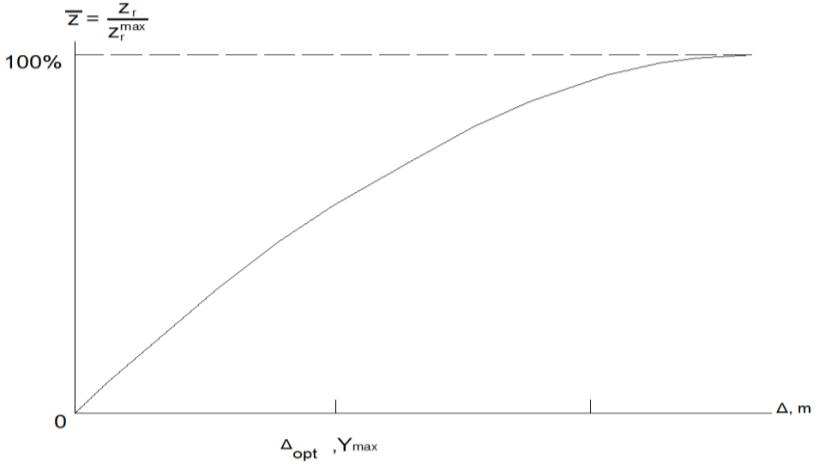


Figura 7. Profundidad de desarrollo radical $\bar{z} = z_r / z_r^{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ. Fuente: Palacios,1990..

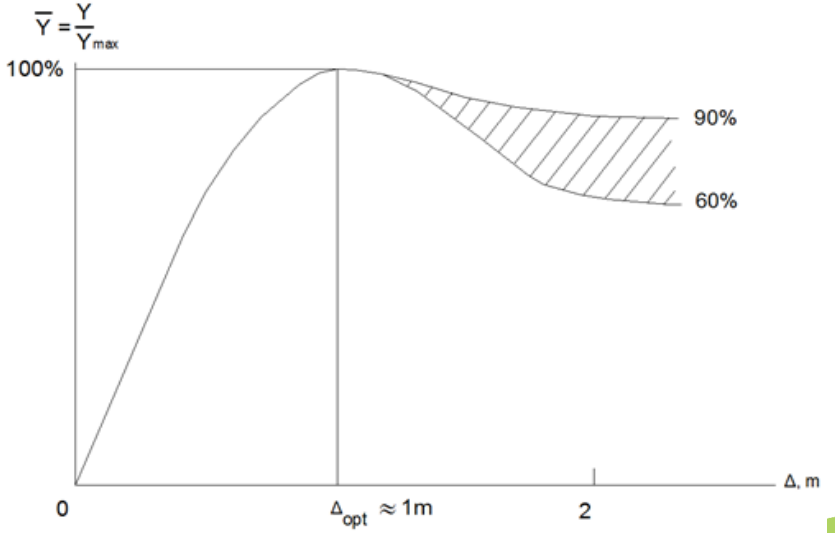


Figura 8. Relación entre el rendimiento relativo Y¯=Y/Y_max en función de la profundidad media del manto freático Δ . Fuente: Palacios,1990.

Requerimientos de los suelos

En la figura se muestra esquemáticamente la gráfica del cambio del volumen de sustancias químicas nutritivas lixiviadas del suelo hacia el manto freático $\overline{G} = G/G_{max}$, 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.

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 Δ > Δopt (en el cual se observa una cosecha máxima Ymax) es del orden de 10%.

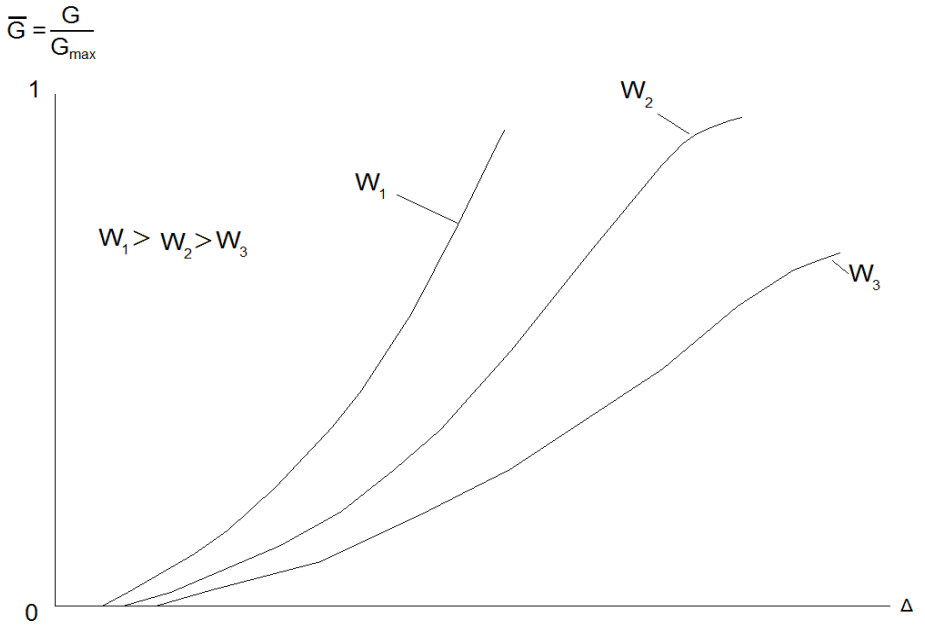


Figura 9. Gráfica esquemática del cambio del volumen de sustancias nutritivas lixiviadas $\bar{G} = G/G_{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ y de la humedad del suelo W. Fuente: Palacios,1990.

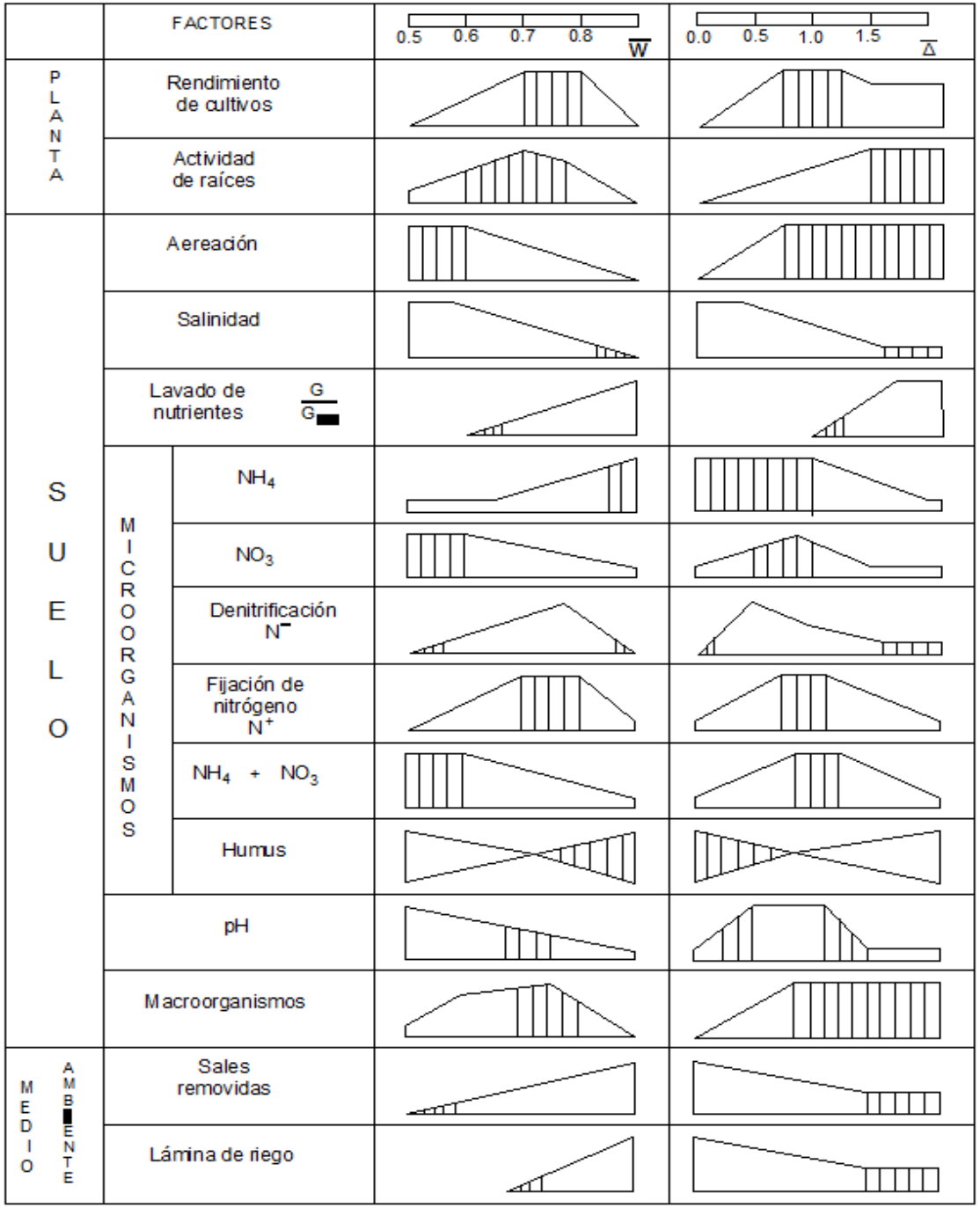
Requerimientos de medio ambiente

Los sistemas de riego y drenaje deben conservar y mejorar 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.

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.

Cuadro - resumen



Cuadro 1. Necesidades de optimización del riego y de los parámetros de drenaje

Fuente: Palacios,1990

2. EL RIEGO Y DRENAJE CONTROLADOS

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.

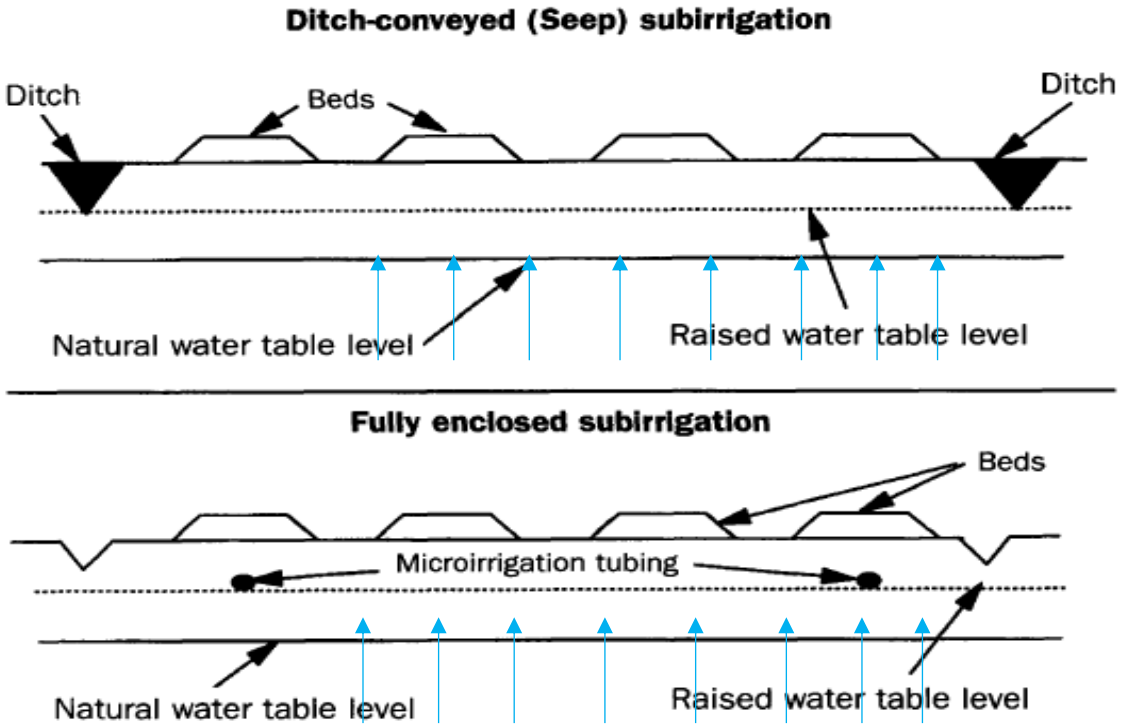


Figura 10. Diagrama de la sección transversal del sistema de subirrigación por medio de zanja (Seep) y del sistema de riego subterráneo totalmente cerrado (FES).

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.

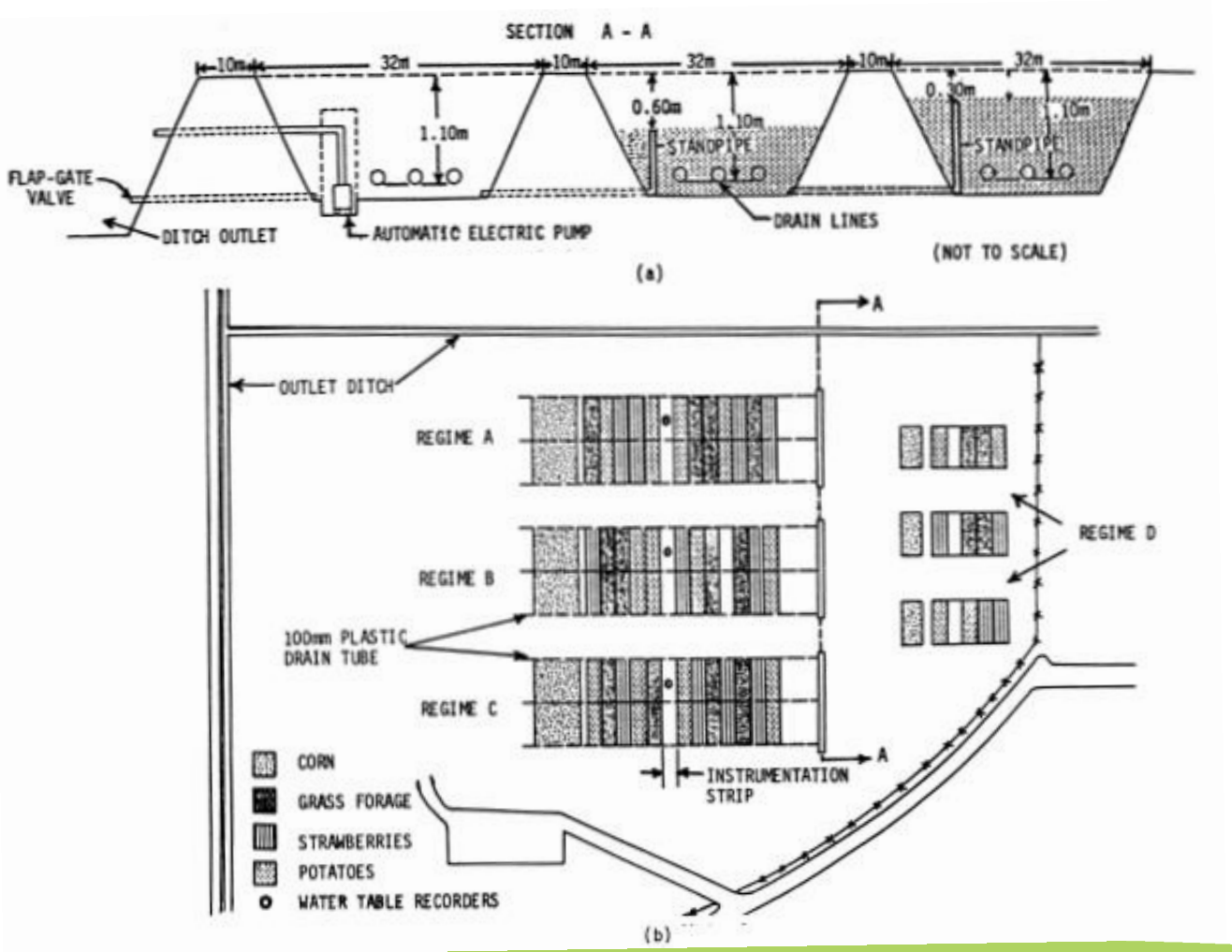


Figura 11. Diseño del experimento de campo

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.

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

(l) Los **costos de mantenimiento son mínimos** para un sistema de drenaje subterráneo bien diseñado que realiza la doble función de drenaje y subirrigación.

(2) Cuando se utiliza un sistema de drenaje subterráneo existente para la 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** en la zona radicular superior **se pueden reducir.**

5. CONTRIBUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA SUPERFICIAL AL USO CONSUNTIVO DE LOS CULTIVOS

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 secano**, utilizando un lisímetro. Los resultados que obtuvieron, fue que, bajo condiciones de secano, **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. 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, (**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 perdidas 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.

Cuadro 2. 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		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	Chaudry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	0.9	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	53	Chaudry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	1.2	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	27	Chaudry et al. (1974)
Wheat	2	Semi-arid	ND	Maintain 0.3 bar	Constant	1.5	0.5, 2.9,5.2	Silt loam	20	Chaudry 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		Semi-arid	Yes	Well watered	Variable	1–1.7		Clay loam to clay	32	Mason et al. (1983)
Cotton	7	Semi-arid		3 and 14 day		1–1.5	28–35	Clay loam to clay		Cohen et al. (1995)
Sugar cane		Humid	Yes			1,1.5,2,2.5,3,4	NS	Silty clay loam		Escolar et al. (1971)
Carrot		Humid	Yes							Schmidhalter et al. (1994)
Eucalyptus		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		Humid	No			0.5–1			65	Omary and Izuno (1995)
Corn	1.7	Semi-arid		As needed	Variable	0.4	NS	Clay loam	42	Ragab and Amer (1986)
Wheat	2									Kang et al. (2001)
Maize	1.7									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		Semi-arid	Yes	Regulated Deficit Irrig.		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)

Fuente: Ayars et al. (2006)

6. Modelación

Existen 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, Mensegue et al., 2015, Satchithanantham 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).

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.

7. ASPECTOS AMBIENTALES

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)

8. CONCLUSIONES

Basándose en la literatura revisada, se presentan las siguientes conclusiones:

- Normalmente los cálculos del régimen de riego no se relacionan con los parámetros de drenaje, lo cual es incorrecto.

- 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 lo que, es necesaria la modelación del régimen de humedad del suelo.

- 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.

- Estudios en áreas húmedas demostraron que es posible utilizar sistemas de drenaje subterráneo controlado, para la subirrigación.

- La revisión demuestra que el agua subterránea superficial tiene el potencial de proveer cantidades significativas de agua para el uso del cultivo.

- 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.

- El agua degradada drenada tiene el potencial de crear significativos impactos negativos al medio ambiente, como resultado del transporte de nutrientes, herbicidas, pesticidas, sedimento, elementos tóxicos.

- 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.

8. BIBLIOGRAFÍA

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.

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

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.

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

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

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.

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.

Palacios, O.L. (1990). Proyecto: Regulación del régimen de humedad de los suelos con riego y drenaje. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias.

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.

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.

Gracias