



Artículo: COMEII-16011

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

CONTROL DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO EN ZONAS SUBHÚMEDAS

Erickdel Castillo Solís^{1*}; Heber Eleazar Saucedo Rojas¹

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 62550 Jiutepec, Morelos, México. erickdel_castillo@tlaloc.imta.mx. (*Autor para correspondencia).

Resumen

En este trabajo se hace una revisión del 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. De la revisión se concluye que: 1) generalmente los cálculos del régimen de riego no se relacionan con los parámetros de drenaje, lo cual es incorrecto, 2) en el manejo del régimen de humedad del suelo, prácticamente no se pueden conjugar los requerimientos de los suelos, de la plantas, y de la conservación de la naturaleza, 3) es posible manejar drenes subterráneos para reducir el agua drenada y almacenar agua en el suelo para uso agrícola, además que el drenaje controlado se puede utilizar como sistema de subirrigación en áreas húmedas, 4) 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, 5) el agua subterránea superficial es un recurso que es ignorado cuando se consideran las alternativas del manejo del agua en el riego agrícola, y 6) se han desarrollado muy pocos modelos para diseñar sistemas de drenaje como una parte de un manejo integral del agua en el suelo.

Palabras clave adicionales: Trópico húmedo, drenaje agrícola, riego y drenaje controlados.



Introducción

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 corto de la estación lluviosa. Esto provoca problemas de exceso y déficit de humedad para los cultivos. Este exceso de lluvia, provoca que los niveles freáticos asciendan, en algunos casos hasta la superficie del suelo.

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, que en el año agrícola 2010 registraron una superficie sembrada de 1,817,472.5 ha, según lo reportado por la Comisión Nacional del Agua en el año 2011, pero se estima que se tiene un potencial de 7.5 millones de hectáreas.

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

Requerimientos en la regulación del régimen hídrico de los suelos

Requerimientos de las plantas

Palacios (1990), menciona que el rendimiento de los cultivos varía fuertemente en función de la humedad del suelo (figura 1). Para la mayoría de los cultivos que se localizan en las zonas tropicales del país, la humedad óptima, la cual permite alcanzar la mayor productividad, se presenta cuando la humedad del suelo ocupa entre el 60 y 80% de la porosidad de este. 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. También se presenta un aumento de 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.

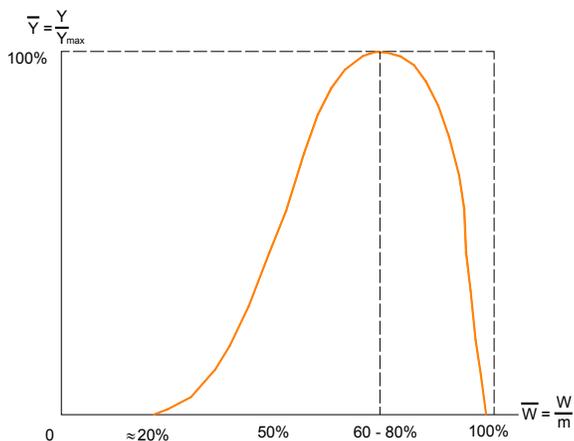


Figura 1. Variación del rendimiento relativo ($\bar{Y}=Y/Y_{max}$), en función de la humedad relativa ($\bar{W}=W/m$). Donde, Y es el rendimiento, Y_{max} es el rendimiento máximo (ambos en unidades de masa entre área, W es el contenido de humedad y m es la porosidad (ambos en porcentaje). Fuente: Palacios, 1990.

Requerimientos de drenaje de los suelos

Palacios (1990), reporta que 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 2, 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. 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.

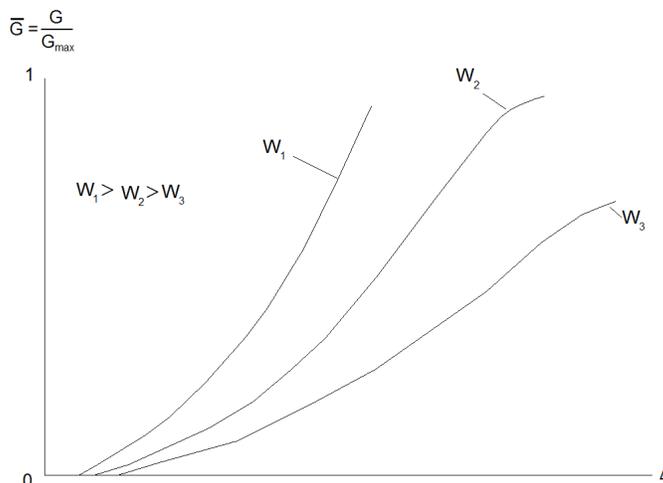


Figura 2. Gráfica esquemática del cambio del volumen de sustancias nutritivas lixiviadas $\bar{G} = G/G_{max}$ en función de la profundidad del manto freático Δ y de la humedad del suelo W . Fuente: Palacios, 1990.

Requerimientos de riego

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. 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.

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.

El riego y drenaje controlados

Shao et al. (2015), 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. 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.

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.

Ayars y Evans (2015), presentaron el estado del arte del drenaje agrícola, en el cual, mencionan que en áreas húmedas, se demostró que es posible manejar drenes subterráneos para reducir el flujo de agua drenada y almacenarla en el suelo para uso agrícola, y que el drenaje controlado ha sido usado como sistema de subirrigación en dichas áreas. En la subirrigación, 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.

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 (1991), 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. (1995), 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.

Ayars y Hutmache (1994), mencionan que 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. En adición, Ayars y Evans (2015), proponen que se desarrollen 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.

Stanley (2004), en tres años (1999-2001), 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.

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 ambos sistemas se utilizaron válvulas que controlaban las aplicaciones de agua, con el objetivo de controlar el nivel freático. En conclusión, el sistema de microirrigación con tuberías, utilizando estructuras para mantener el nivel freático a 45 cm de profundidad, ahorró 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.

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.

Contribución del agua subterránea al uso consuntivo de los cultivos

Ayars et al. (2006) mencionan que 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 y Evans (2015), en este sentido concluyen que 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 (2006) reporta, que 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), mencionan que la literatura 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.

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. Ayars y Evans (2015), reportan que 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.

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 pérdidas 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.

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. Un lisímetro de pesada se 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

Nosetto et. al. (2009), mencionan que en regiones con un nivel freático superficial, el agua subterránea puede tener un impacto positivo o negativo en los rendimientos de los cultivos. 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 de 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. (2007), publicaron 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.

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 estuvo entre 3 y 8 metros de profundidad el flujo vertical del agua fue prácticamente 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.

Daranelli y Collino (2002), 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 (1996), reportó 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.

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

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 SWATRE ejemplifica el primer enfoque y DRAINMOD al segundo.

El modelo SWATRE 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. Skaggs (2008), menciona que este modelo fue desarrollado para el diseño y evaluación de múltiples componente del drenaje y sistemas relacionados con el manejo del agua. 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).

Conclusiones

Generalmente 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.



Durante el mejoramiento de los suelos, por medio del control del régimen de humedad, prácticamente no se pueden conjugar los requerimientos de los suelos, de la plantas, y de la conservación de la naturaleza. 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.

Estudios en áreas húmedas demostraron que es posible manejar drenes subterráneos para reducir el agua drenada y almacenar agua en el suelo para uso agrícola, además que el drenaje controlado ha utilizado como sistema de subirrigación en áreas húmedas.

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.

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.

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.

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. Los principales modelos son; SWATRE y DRAINMOD.

El drenaje controlado tiene el potencial de disminuir los 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 subterráneo.



Referencias bibliográficas

- 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.
- 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.
- CONAGUA (2011). Estadísticas agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado: Año agrícola 2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Palacios, O.L. (1990). Proyecto: Regulación del régimen de humedad de los suelos con riego y drenaje. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias.
- 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.
- 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.
- Torres, J. S., y Hanks, R. J. (1989). Modeling water table contribution to crop evapotranspiration. *Irrigation Science*, 10(4), 265-279.
- 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.