

Modeling of soil water to ensure a suitable depth and spacing of subsurface drip irrigation for alfalfa

Modelación de la humedad del suelo para garantizar profundidad y espaciamiento adecuados mediante riego por goteo subterráneo en alfalfa

Rocio Guadalupe Reyes-Esteves*; Donald Carl Slack

University of Arizona, Department of Biosystems Engineering, 1177 E. 4th Street, Shantz Building, Room 609, Tucson, AZ, P. C. 85721, UNITED STATES OF AMERICA.

*Corresponding author: rocior@email.arizona.edu, tel. +1 (520) 658-7217.

Abstract

Introduction: A major design issue in implementing a subsurface drip irrigation (SDI) system is determining the appropriate drip tape placement depth to allow basic farming operations while still providing adequate water to the crop.

Objective: To determine the appropriate placement depth of the SDI tapes using modeling techniques and classical soil mechanics theory.

Methodology: The HYDRUS-2D program was used to determine the wetting pattern, after 12 h of irrigation, of a SDI emitter installed at 50 cm depth in three soil types: sandy clay loam (SCL), clay loam (CL) and loam (L), and classical soil mechanics theory was used to calculate the increase in soil stress at different depths.

Results: The vertical capillary rise above the dripline was 27, 30 and 22 cm for SCL, CL and LF soils, respectively. The minimum dripline placement depth to avoid failure is 40 cm in SCL and L soils, and 35 cm for CL soil.

Study limitations: The physical properties and hydraulic parameters of the soil were obtained from the literature, and the soil mechanics theory results were not calibrated with field measurements.

Originality: This is the first study in which soil mechanics is used to determine the spacing and installation depth of SDI system tapes.

Conclusions: This type of study is helpful in determining the SDI dripline placement depth to ensure adequate trafficability under these irrigation systems.

Keywords: SDI, HYDRUS-2D, soil shear strength, *Medicago sativa* L., soil types.

Resumen

Introducción: Un problema importante de diseño en la implementación de un sistema de riego por goteo subterráneo (RGS) es determinar la profundidad de instalación de la cinta de goteo que permita realizar las operaciones agrícolas y proporcione la cantidad adecuada de agua al cultivo.

Objetivo: Determinar la profundidad adecuada de instalación de las cintas de RGS mediante técnicas de modelación y la teoría clásica de mecánica de suelos.

Metodología: Se utilizó el programa HYDRUS-2D para determinar el patrón de mojado, después de 12 h de riego, de un emisor de RGS instalado a 50 cm de profundidad en tres tipos de suelo: franco arcillo arenoso (FAA), franco arcilloso (FA) y franco (F), y con la teoría clásica de mecánica de suelos se calculó el aumento de la tensión en el suelo a diferentes profundidades.

Resultados: La elevación capilar vertical, por encima de la cinta de goteo, fue de 27, 30 y 22 cm para los suelos FAA, FA y F, respectivamente. La profundidad mínima de instalación de la cinta para evitar fallas es de 40 cm en suelos FAA y F, y de 35 cm para los FA.

Limitación del estudio: Las propiedades físicas y los parámetros hidráulicos del suelo se obtuvieron de la literatura, y los resultados de la teoría de mecánica de suelos no se calibraron con mediciones en campo.

Originalidad: Este es el primer estudio en el que se utiliza mecánica de suelos para determinar el espaciamiento y la profundidad de instalación de las cintas del sistema de RGS.

Conclusiones: Este tipo de estudio es útil para determinar la profundidad de colocación de las cintas de RGS a fin de garantizar una transitabilidad adecuada bajo estos sistemas de riego.

Palabras clave: RGS, HYDRUS 2-D, resistencia al esfuerzo cortante del suelo, *Medicago sativa* L., tipos de suelo.



Introduction

The use of precision irrigation systems and their adequate design, management and scheduling plays a vital role in ensuring water application in the right place, with the right amount, at the right time. However, these practices are still under research and require a lot of experimental work, studies, and analysis to determine their viability and applicability (Al-Karadsheh, Sourell, & Krause, 2002). When irrigation engineers design an irrigation system, they try to maximize irrigation efficiency which is defined as the ratio of the volume of water that is taken up by the crop to the amount of irrigation water applied (American Society of Agricultural Engineers [ASAE], 1996). Subsurface drip irrigation (SDI) systems have the potential to increase that efficiency. A well-designed SDI system can reduce the volume of applied water by about 22 %, while increasing the yield by 7 %, compared to using a center pivot sprinkler system (Alam, Trooien, Dumler, & Rogers, 2002).

First SDI systems were applied to row crops such as corn or cotton where driplines were placed 8-10 cm below the surface of alternate rows. This allowed farm equipment such as tractors with cultivators and fertilizer or pesticide applicators to traverse the rows which did not have driplines under them in a “controlled traffic” system. As the technology continued to evolve, farmers became interested in utilizing SDI on “extensively” grown crops which are not planted in rows but are sown continuously throughout the field (Slack & Liga, 2010). One such extensively grown crop in the US is the forage crop alfalfa (*Medicago sativa* L.) which has rooting depths of up to 2 m. This crop has been increasing steadily in 13 western states of the U.S., and more than 404686 ha have been added during the last decade (Alam, Trooien, Rogers, & Dumler, 2002).

Alfalfa is harvested as frequently as every two weeks, and the harvest operation requires a tractor and other heavy equipment to be driven over much of the surface of the field. Thus, dripline cannot be placed so close to the soil surface that the surface becomes wetted, or the tractor would at best leave deep damage in the field or at worst become “stuck”. A practical alternative has been to place the dripline at a depth high enough that the soil surface will not become wetted but is still shallow enough to deliver water to the plant roots. Up to this point in time, appropriate depths for such systems have been determined by “trial and error” for each new soil and equipment condition (Slack & Liga, 2010).

The general objective of this study was to determine a suitable placement depth of SDI driplines using well-established modeling techniques and classical soil mechanics theory. The specific objectives were to determine the vertical extent of the wetted zone above

Introducción

El uso de sistemas de riego de precisión y su adecuado diseño, manejo y programación, juega un papel preponderante en la aplicación adecuada de agua en cuanto al lugar, cantidad y momento. Sin embargo, estas prácticas aún están bajo investigación y requieren mucho trabajo y análisis experimental para determinar su viabilidad y aplicabilidad (Al-Karadsheh, Sourell, & Krause, 2002). Cuando se diseña un sistema de riego, se trata de maximizar la eficiencia del riego, la cual se define como la relación entre el volumen de agua aprovechado por el cultivo y la cantidad de agua de riego aplicada (American Society of Agricultural Engineers [ASAE], 1996). En este sentido, los sistemas de riego por goteo subterráneo (RGS) tienen el potencial de aumentar dicha eficiencia. Un sistema de RGS puede reducir el volumen de agua aplicado en aproximadamente 22 %, y aumentar el rendimiento en un 7 %, en comparación con un sistema de pivote central (Alam, Trooien, Dumler, & Rogers, 2002).

Los primeros sistemas de RGS se utilizaron en cultivos de surcos, como el maíz o el algodón, en los que se colocaban las cintas de goteo a 8 o 10 cm de profundidad en surcos alternados. Esto permitía que los equipos agrícolas, como tractores con sembradoras y aplicadores de fertilizantes o pesticidas, recorrieran los surcos que no tenían cintas de goteo, siendo así un sistema de “tráfico controlado”. A medida que esta tecnología fue evolucionando, los agricultores se interesaron en utilizar el RGS en cultivos extensivos, los cuales no se plantan en surcos, sino que se siembran continuamente en todo el terreno (Slack & Liga, 2010). Uno de estos cultivos en EUA es la alfalfa forrajera (*Medicago sativa* L.), la cual tiene profundidades de enraizamiento de hasta 2 m. Este cultivo ha ido en aumento en 13 estados del oeste de Estados Unidos, y más de 404685 ha han sido agregadas durante la última década (Alam, Trooien, Rogers, & Dumler, 2002).

La alfalfa se cosecha con una frecuencia de hasta cada dos semanas, y esta operación requiere que un tractor y otros equipos pesados sean conducidos sobre gran parte de la superficie del terreno. Por ello, la cinta de goteo no se puede instalar tan cerca de la superficie del suelo, ya que la humedad del suelo y el peso del tractor pueden ocasionar, en el mejor de los casos, un daño profundo en el terreno o, en el peor de los casos, que el tractor se quede atascado. Una alternativa práctica ha sido colocar la cinta a una profundidad suficiente como para que la superficie del suelo no se moje, pero, al mismo tiempo, lo suficientemente somera como para regar las raíces de la planta. Actualmente, las profundidades adecuadas para tales sistemas han sido determinadas mediante “prueba y error”, para cada nueva condición del suelo y del equipo de riego (Slack & Liga, 2010).

SDI tubes in three different soils, Sandy Clay Loam (SCL), Clay Loam (CL) and Loam (L). An additional objective was to determine the increased stress at specific depths due to the weight of a farm tractor on the soil surface, and to use this information together with soil strength properties to determine the appropriate depth of placement of drip tubes. Finally, the ultimate objective is to ensure that soil failure does not occur when the tractor is driven over the drip tubing while irrigation is in progress. Another result of the modeling exercise was the determination of the lateral extent of the wetted zone which can be used to determine the appropriate lateral spacing between drip line tubing.

Materials and methods

In this study, the two-dimensional module of the HYDRUS-2D/3D package (Simunek, van Genuchten, & Sejna, 2006, 2008) was used to determine the wetting pattern from a subsurface drip emitter for three soil types typically found in Southern California (Table 1) with an irrigation time of 12 h and a frequency of every three days. Then, classical soil mechanics theory was applied to calculate the increase in soil stress at different depths due to a load on the surface from a typical farm tractor used in harvest operations. This information was then used in conjunction with soil strength properties such as shear strength as a function of soil moisture content to determine the minimum

Por lo anterior, el objetivo general fue determinar la profundidad adecuada de instalación de las cintas de RGS mediante técnicas de modelación bien establecidas y la teoría clásica de mecánica de suelos. Los objetivos específicos fueron determinar la longitud vertical de mojado, por encima de las cintas de riego, en tres suelos diferentes: franco arcillo arenoso (FAA), franco arcilloso (FA) y franco (F); asimismo, se determinó el incremento de la tensión del suelo, a profundidades específicas, debido al peso de un tractor agrícola sobre la superficie. Esta información, junto con las propiedades de resistencia de los suelos, se utilizó para determinar la profundidad adecuada de instalación de las cintas de goteo. Por último, se garantizó que no se produzcan grietas en el suelo cuando el tractor pase por encima de las cintas de goteo mientras el riego está en curso. Como resultado adicional del modelado, se determinó la longitud lateral de mojado, la cual se puede utilizar para establecer el espacio lateral adecuado entre las cintas de goteo.

Materiales y métodos

Se utilizó el módulo de dos dimensiones del programa HYDRUS-2D/3D (Simunek, van Genuchten, & Sejna, 2006, 2008) para determinar el patrón de mojado de un emisor de goteo subterráneo en tres tipos de suelo encontrados comúnmente en el Sur de California (Cuadro 1), con un tiempo de riego de 12

Table 1. Physical properties of the soil types.

Cuadro 1. Propiedades físicas de los tipos de suelos.

Properties / Propiedades	Sandy clay loam / Franco arcilloso arenoso	Clay loam / Franco arcilloso	Loam / Franco
Sand (%) / Arena (%)	60.0	30.0	40.0
Silt (%) / Limo (%)	15.0	35.0	40.0
Clay (%) / Arcilla (%)	25.0	35.0	20.0
Bulk density (kg·m ⁻³) / Densidad aparente (kg·m ⁻³)	1620	1560	1510
Saturated moisture content (%) / Contenido de humedad saturado (%)	43.0	48.0	46.0
50 % moisture content / Contenido de humedad al 50 %	5.00	7.00	7.00
Field capacity (90 % saturated) / Capacidad de campo (90 % saturado)	27.0	36.0	28.0
Saturated conductivity (cm·h ⁻¹) / Conductividad saturada (cm·h ⁻¹)	1.13	0.43	1.55
Angle internal friction (degrees) / Ángulo de fricción interna (grados)	32.5	25.0	30.0
Cohesion compacted (kPa) / Cohesión compactada (kPa)	61.78	82.37	74.53
Cohesion saturated (kPa) / Cohesión saturada (kPa)	14.70	14.70	14.70
Cohesion 90 % saturated (kPa) / Cohesión saturada al 90 % (kPa)	12.74	12.74	12.74

permissible depth of placement of drip line tubing to ensure that soil failure does not occur. The lateral extent of the wetting pattern at the end of irrigation was used to determine the maximum spacing at which an SDI system will provide adequate crop irrigation throughout the field in a particular soil.

Based on the data in Table 1, a relationship between soil cohesion and moisture was established for the three soil types (Figure 1).

HYDRUS-2D is a two-dimensional finite element model that provides a numerical solution of the Richards equation (Equation 1) to simulate soil moisture and water flow in unsaturated soils (Kandelous et al., 2012).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (1)$$

Where θ denotes the soil volumetric water content ($L^3 \cdot L^{-3}$), $K(h)$ is the unsaturated hydraulic conductivity ($L \cdot T^{-1}$), x and z are the coordinates (horizontal and vertical) (L), $S(h)$ is a sink term ($L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$) for the plant root water uptake, h signifies the soil water pressure head (L), and t is time (T).

A solution of Equation (1) requires characterization of the soil hydraulic properties, as defined by the soil water retention [$\theta(h)$] and unsaturated hydraulic conductivity function [$K(h)$]. The constitutive relationships of van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) were used and represented the effective saturation (S_e) by:

h y una frecuencia de cada tres días. Posteriormente, con la teoría clásica de mecánica de suelos, se calculó el aumento de la tensión del suelo a diferentes profundidades debido al peso promedio de un tractor agrícola utilizado en las operaciones de cosecha sobre la superficie. Se utilizó esta información junto con propiedades de resistencia del suelo, tales como resistencia al esfuerzo cortante (esto como una función del contenido de humedad del suelo), para determinar la profundidad mínima permisible de colocación de la cinta de goteo, y garantizar que no ocurran problemas en el suelo. Por su parte, la longitud lateral del patrón de mojado se usó para determinar el espaciamiento máximo en el cual un sistema de RGS proporciona un riego adecuado al cultivo en todo el terreno en un suelo determinado.

A partir de los datos del Cuadro 1, se estableció una relación entre la cohesión y la humedad del suelo para los tres tipos de suelo (Figura 1).

El modelo bidimensional de elementos finitos HYDRUS-2D proporciona una solución numérica de la ecuación de Richards (Ecuación 1) para simular la humedad del suelo y el flujo de agua en suelos no saturados (Kandelous et al., 2012).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (1)$$

Donde θ denota el contenido volumétrico de agua del suelo ($L^3 \cdot L^{-3}$), $K(h)$ es la conductividad hidráulica no

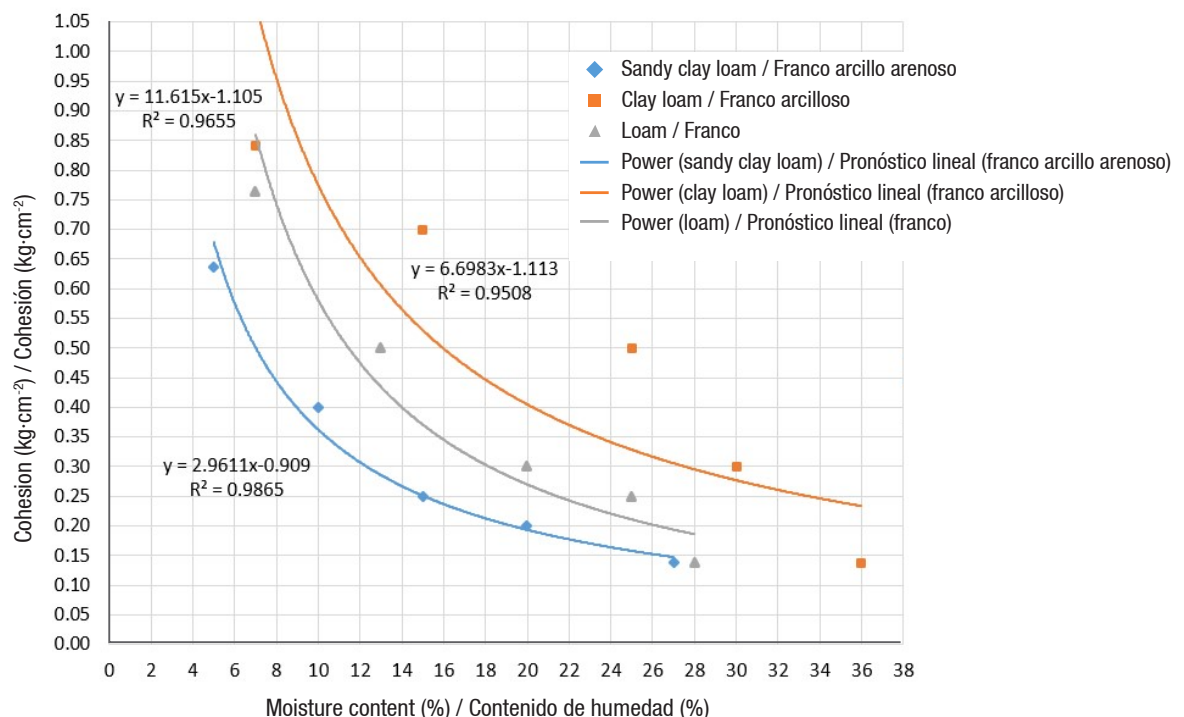


Figure 1. Relationship between cohesive strength and moisture content for the three soil types.
Figura 1. Relación entre fuerza de cohesión y contenido de humedad de los tres tipos de suelo.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha_{VG} h|^n)^m} \quad (2)$$

and

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

where θ_s and θ_r represent the saturated and residual water content ($L^3 \cdot L^{-3}$), respectively, K_s is the saturated hydraulic conductivity ($L \cdot T^{-1}$), α_{VG} (L^{-1}), n and l are shape parameters, and $m = 1 - 1/n$. Table 2 lists the hydraulic function parameter values of the soils used and included in the HYDRUS-2D program.

The spatial distribution of the plant roots of alfalfa exert a strong influence on soil water flow, root water uptake, and deep drainage. Therefore, it primarily determines deep percolation and actual plant transpiration for a given irrigation strategy. A root distribution with the most significant root density at a depth of 30 cm (near the emitter), was obtained from field measurements at Holtville, California. This distribution was used for the simulations. The sink term $[S(h)]$ is used in Equation (1) to quantify root water uptake, using the commonly employed approach of Feddes, Kowalik, Kolinska-Malinka, and Zaradny (1976) for alfalfa:

$$S(h) = \alpha(h) * S_p \quad (4)$$

Where $\alpha(h)$ is a dimensionless root water uptake reduction function with values between zero and one, this to account for soil water stress. If the soil maintains favorable conditions for root water uptake, $S(h)$ is equal to the potential root water uptake rate, (S_p ; $L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$). However, if the soil is too dry or too wet at any given location (x, z), then $\alpha < 1$, and the uptake at position (x, z) is linearly reduced with the magnitude determined by the reduction function parameters for alfalfa as selected from a data-base (Taylor & Ashcroft, 1972). The S_p is dependent on crop evapotranspiration (Simunek & Hopmans, 2009), and is calculated from:

$$S_p(x, y) = \beta(x, z) L_x T_p \quad (5)$$

Where $\beta(x, z)$ represents the normalized root density for any coordinate in the two-dimensional soil domain (L^2)

saturada ($L \cdot T^{-1}$), x y z son las coordenadas (horizontal y vertical) (L), $S(h)$ es un término de sumidero ($L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$) para la absorción de agua por las raíces de la planta, h representa la carga de presión de agua en el suelo (L) y t es el tiempo (T).

Una solución de la Ecuación (1) requiere la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo, definidas por la retención de agua del suelo $[\theta(h)]$ y la función de conductividad hidráulica no saturada $[K(h)]$. Las relaciones constitutivas de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) se utilizaron y representaron la saturación efectiva (S_e) mediante:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha_{VG} h|^n)^m} \quad (2)$$

and

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

donde θ_s y θ_r representan el contenido de agua saturada y residual ($L^3 \cdot L^{-3}$), respectivamente, K_s es la conductividad hidráulica saturada ($L \cdot T^{-1}$), α_{VG} (L^{-1}), n y l son parámetros de forma, y $m = 1 - 1/n$. El Cuadro 2 presenta los valores de los parámetros de la función hidráulica de los suelos utilizados e incluidos en el programa HYDRUS-2D.

La distribución espacial de las raíces de alfalfa ejerce una fuerte influencia en el flujo de agua del suelo, la absorción de agua de las raíces y el drenaje profundo. Por lo tanto, dicha distribución determina, principalmente, la percolación profunda y la transpiración real de las plantas para una estrategia de riego determinada. La distribución radicular se obtuvo de la mayor densidad de raíces a una profundidad de 30 cm (cerca del emisor) a partir de las mediciones de campo en Holtville, California, y fue la que se utilizó para las simulaciones. El término sumidero $[S(h)]$ se utiliza en la Ecuación (1) para cuantificar la absorción de agua de las raíces, y emplea el enfoque de Feddes, Kowalik, Kolinska-Malinka, y Zaradny (1976) para la alfalfa:

$$S(h) = \alpha(h) * S_p \quad (4)$$

donde $\alpha(h)$ es una función adimensional de reducción de la absorción de agua de las raíces con valores entre

Table 2. Soil hydraulic function parameters for used soils and included in HYDRUS-2D.

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos de los suelos utilizados e incluidos en HYDRUS-2D.

Soil type / Tipo de suelo	θ_r ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	α_{VG} (cm^{-1})	n	K_s ($cm \cdot day^{-1}$)	l
Clay loam / Franco arcilloso	0.095	0.41	0.019	1.31	6.24	0.5
Loam / Franco	0.078	0.43	0.036	1.56	54.96	0.5
Sandy clay loam / Franco arcillo Arenoso	0.1	0.39	0.059	1.48	31.44	0.5

and L_x denotes the width of the soil surface (L) associated with the potential plant transpiration (T_p ; $L \cdot T^{-1}$).

To simulate a typical drip irrigation system, an emitter flow rate (q) of 0.68 lph with an emitter spacing of 36 cm was utilized in the model. The emitter was placed at 50 cm below the soil surface in a domain area of 100 cm high by 200 cm wide. The model was then used to simulate a typical irrigation time of 12 h. The initial condition assumed a soil-water content at field capacity (-33 kPa). The model results provided volumetric soil moisture content as a function of time and space, in the solution domain described above. This wetting pattern was then utilized to determine horizontal spacing and appropriate depth placement of the tubing.

The increase in soil stress at different depths resulting from a surface load can be calculated using the Boussinesq equation:

$$\Delta p = \frac{3P}{Z^2 * 2\pi * \left[1 + \left(\frac{r}{Z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (6)$$

where P is a point load at the surface (kg), Δp is the increase in stress (kPa) at a depth z below the surface and a radial distance r from the surface point load. This increase in stress is independent of soil properties. For uniform loads spread over a contact area, a set of tables developed by Newmark (Hough, 1969) can be used to determine the increase in stress under such uniform loads.

Results and discussion

Extensive crops such as alfalfa which cover the surface require that field machinery periodically traverse the area. Such equipment produces a surface load spread over the contact areas of the wheels in contact with the surface. For this study, a four-wheel rubber-tired tractor was utilized with a rear tire that produced a footprint contact area of 86.36 x 42.92 cm (3707.09 cm²). The tractor weight was 3300 kg dispersed 65 % to the rear wheels and 35 % to the front. The wheelbase was 2.33 m and wheel spacing 1.6 m. The most considerable increase in stress would occur directly below one of the rear tires and would result from the load from that tire as well as the contribution to the stress increase from the other three tires. Since the effect of contact area decreases rapidly with depth, the Newmark solution was used for stress increase directly below one rear tire, and the Equation 6 was utilized to calculate the contributions of the other three tires.

Once the soil wetting pattern from 12 h of irrigation for each soil and the increase in stress at several depths due to the load of the tractor on the surface were determined, then the Mohr's rupture theory was applied to determine the depth and soil moisture

cero y uno, esto para tener en cuenta el estrés hídrico del suelo. Si el suelo mantiene condiciones favorables para la absorción de agua de las raíces, $S(h)$ es igual a la tasa potencial de absorción de agua de la raíz (S_p ; $L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$). Sin embargo, si el suelo es demasiado seco o demasiado húmedo en un determinado lugar (x, z), entonces $\alpha < 1$, y la absorción en la posición (x, z) se reduce linealmente con la magnitud determinada por los parámetros de la función de reducción para la alfalfa seleccionados de una base de datos (Taylor & Ashcroft, 1972). La S_p depende de la evapotranspiración del cultivo (Simunek & Hopmans, 2009) y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$S_p(x, y) = \beta(x, z) L_x T_p \quad (5)$$

donde $\beta(x, z)$ representa la densidad radicular normalizada para cualquier coordenada en el dominio bidimensional del suelo (L^2) y L_x denota el ancho de la superficie del suelo (L) asociado con la transpiración potencial de la planta (T_p ; $L \cdot T^{-1}$).

Para simular un sistema estándar de riego por goteo, se utilizó un caudal (q) de 0.68 lph, con un espaciado entre emisores de 36 cm. El emisor se colocó a 50 cm por debajo de la superficie del suelo, en un área de dominio de 100 cm de alto por 200 cm de ancho. El modelo se utilizó para simular un tiempo de riego estándar de 12 h, en donde el contenido de agua inicial en el suelo fue a capacidad de campo (-33 kPa). Los resultados del modelo proporcionaron un contenido volumétrico de humedad del suelo en función del tiempo y del espacio, en el dominio de la solución descrito anteriormente. Este patrón de mojado se utilizó para determinar el espaciamiento horizontal y la profundidad adecuada de las cintas de riego.

El aumento del esfuerzo o la tensión del suelo a diferentes profundidades, resultante de un peso superficial, puede calcularse mediante la ecuación de Boussinesq:

$$\Delta p = \frac{3P}{Z^2 * 2\pi * \left[1 + \left(\frac{r}{Z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (6)$$

donde P es un punto de carga en la superficie (kg), Δp es el aumento de la tensión (kPa) a una profundidad z por debajo de la superficie y una distancia radial r del punto de carga en la superficie. Este aumento de la tensión es independiente de las propiedades edafológicas. Para cargas uniformes repartidas sobre un área de contacto, se puede utilizar un conjunto de tablas desarrolladas por Newmark (Hough, 1969) para determinar el aumento de la tensión bajo tales cargas uniformes.

Resultados y discusión

Los cultivos extensivos como la alfalfa, que cubren en su totalidad la superficie, requieren que la maquinaria

conditions at which shear failure would occur due to the surface load. Then this information was used to determine the minimum depth placement to avoid this failure condition.

Simulated moisture content above the emitter at the day of the irrigation cut after 12 h of irrigation for the SCL, CL and L soils are shown from Figures 2, 3 and 4, respectively. The moisture content reaches near

agrícola atraviese periódicamente el terreno. Estos equipos producen un área de distribución de peso sobre las zonas de contacto de las ruedas con la superficie. Para este estudio, se utilizó un tractor de cuatro ruedas, el cual produce un áreas de contacto de 86.36 x 42.92 cm (3707.09 cm²) con los neumáticos traseros. El peso del tractor fue de 3300 kg, repartido en 65 % en las ruedas traseras y 35 % en las delanteras. La distancia entre ejes fue 2.33 m y el espacio entre ruedas de 1.6 m.

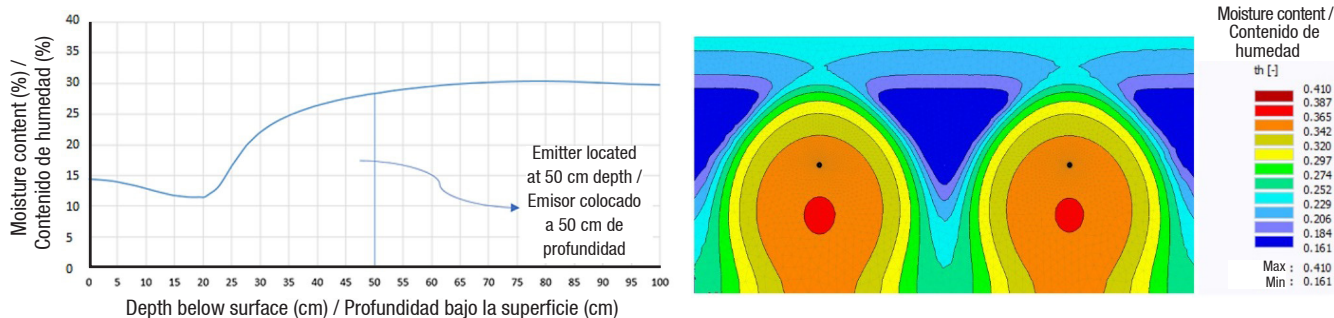


Figure 2. Moisture content on the day of the cut, after 12 h of irrigation, in sandy clay loam soil with an emitter placement depth of 50 cm.

Figura 2. Contenido de humedad el día del corte, después de 12 h de riego, en suelo franco arcilloso arenoso con una profundidad de colocación del emisor de 50 cm.

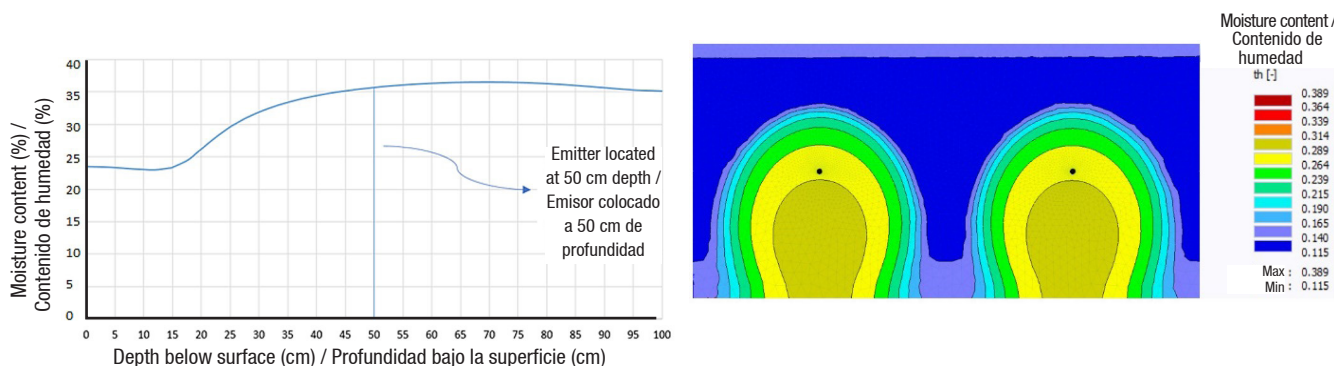


Figure 3. Moisture content on the day of the cut, after 12 h of irrigation, in clay loam soil with an emitter placement depth of 50 cm.

Figura 3. Contenido de humedad el día del corte, después de 12 h de riego, en suelo franco arcilloso con una profundidad de colocación del emisor de 50 cm

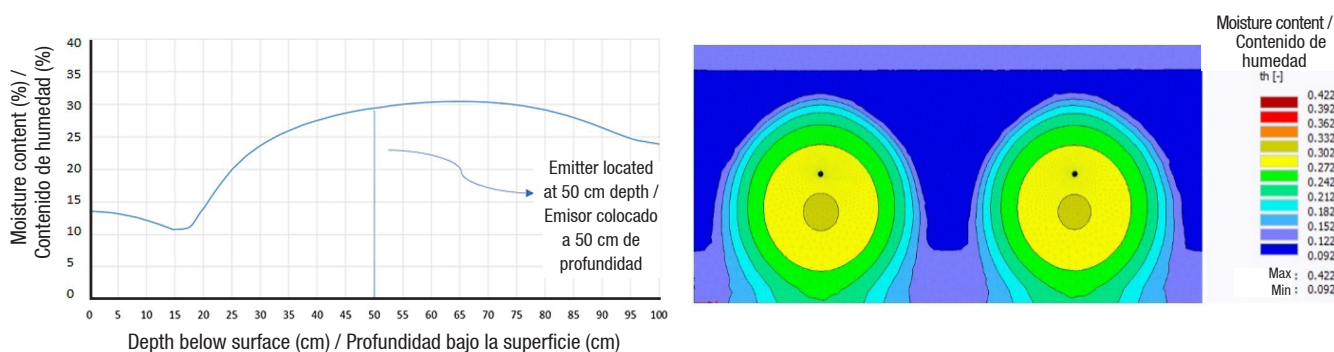


Figure 4. Moisture content on the day of the cut, after 12 h of irrigation, in loam soil with an emitter placement depth of 50 cm.

Figura 4. Contenido de humedad el día del corte, después de 12 h de riego, en suelo franco con una profundidad de colocación del emisor de 50 cm

saturation at 4 cm above the emitter for the SCL, 8 cm for the CL and 5 cm for the L soil. At those moisture contents, the soil has little or no shear strength, so the drip emitters will need to be placed at a greater depth to avoid failure due to the added load of the tractor. Table 3 shows increases in stress at depths up to 50 cm below the surface due to the load of the tractor on the surface.

Since the greatest stress is near the surface, we used the stress at that depth (10 cm) to develop a Mohr's circle of failure and failure envelope for each soil type. Figure 5 indicates that a minimum cohesive strength of 14.70 kPa would be essential to avoid failure for the SCL soil. Similarly, the minimum cohesive strength for the CL and L soils would be 17.65 kPa and 15.69 kPa respectively (Figures 6 and 7).

From Figure 1 it can be seen that a cohesive strength of 14.70 kPa occurs at a moisture content of about 26.8 % for the SCL soil, which is produced at 10 cm above the emitter (Figure 2). Hence, the minimum SDI system placement depth for this type of soil is 40 cm. Similarly, the cohesive strength of 17.65 kPa in CL soil

Si se consideran dichas condiciones, el mayor aumento de la tensión se produce directamente debajo de uno de los neumáticos traseros, y es el resultado de la carga de ese neumático y de la contribución al aumento de la tensión de los otros tres neumáticos. Dado que el efecto del área de contacto disminuye rápidamente con la profundidad, se utilizó la solución de Newmark para el aumento de la tensión directamente debajo de un neumático trasero, y la Ecuación 6 se usó para calcular las contribuciones de los otros tres neumáticos.

Una vez que se determinaron el patrón de mojado del suelo después de 12 h de riego y el aumento de la tensión a varias profundidades debido al peso de un tractor en la superficie, se aplicó la teoría de ruptura de Mohr para determinar la profundidad y las condiciones de humedad del suelo en las que se produciría un quiebre por el esfuerzo cortante debido al peso superficial. Subsecuentemente, esta información se utilizó para determinar la profundidad mínima de instalación para evitar esta condición de ruptura.

El contenido de humedad simulado por encima del emisor el día de corte, después de 12 h de riego, para

Table 3. Stress increase due to surface load of the tractor with front tire no. 4.

Cuadro 3. Aumento en la tensión debido a la carga superficial del tractor con el neumático delantero núm. 4.

Emitter placement depth (cm) / Profundidad de colocación del emisor (cm)	Surface stress (kPa) / Tensión superficial (kPa)
10	57.87
20	43.87
30	31.42
40	16.39
50	11.66

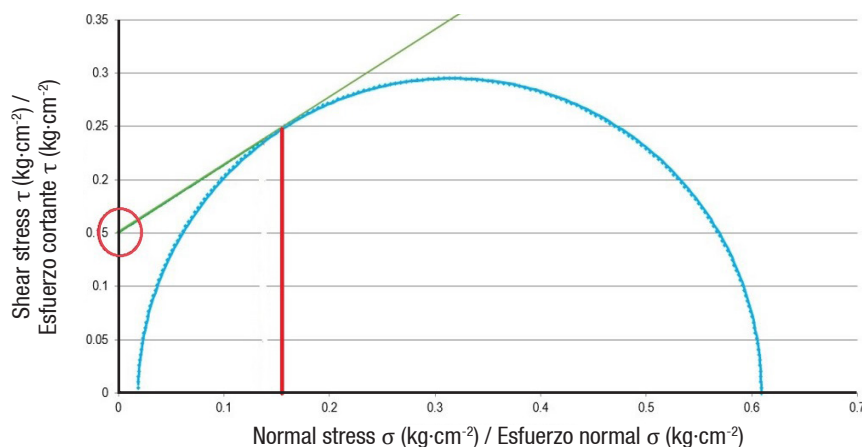


Figure 5. Mohr's circle and failure envelope for sandy clay loam soil at 10 cm depth with a tractor load at the surface.
Figura 5. Círculo de Mohr y envolvente de ruptura para suelo franco arcilloso arenoso a 10 cm de profundidad con el peso de un tractor en la superficie.

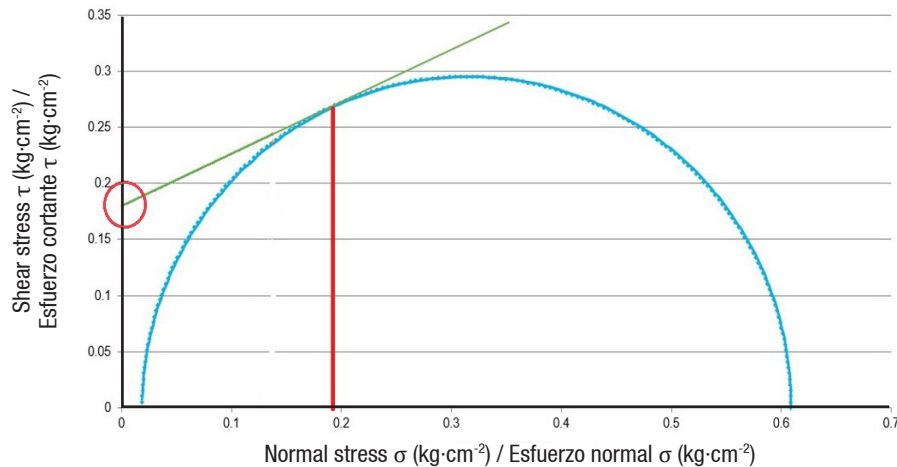


Figure 6. Mohr's circle and failure envelope for clay loam soil at 10 cm depth with a tractor load at the surface.
Figura 6. Círculo de Mohr y envolvente de ruptura para suelo franco arcilloso a 10 cm de profundidad con el peso de un tractor en la superficie.

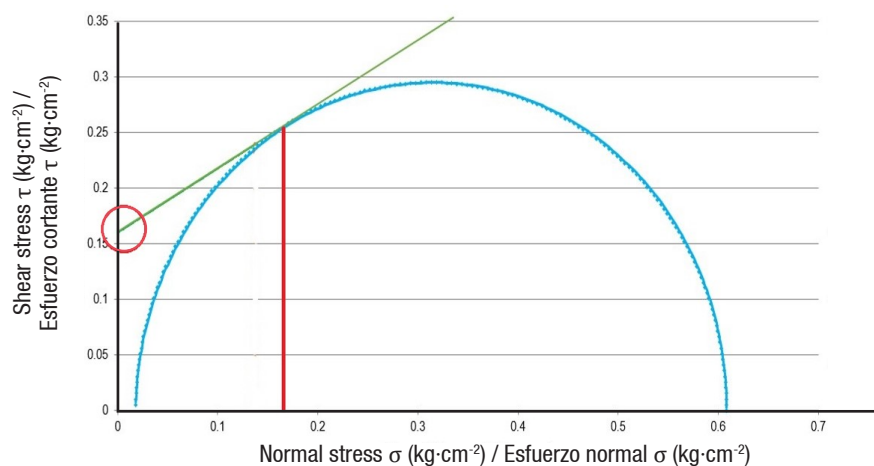


Figure 7. Mohr's circle and failure envelope for loam soil at 10 cm depth with a tractor load at the surface.
Figura 7. Círculo de Mohr y envolvente de ruptura para suelo franco a 10 cm de profundidad con el peso de un tractor en la superficie.

is produced at a moisture content of 32.7 % (Figure 1), which occurs at 15 cm above the emitter (Figure 3), resulting in a minimum SDI system placement depth of 35 cm. For the L soil, the same analysis yields a minimum installation depth of 40 cm.

Finally, the greatest lateral extent of wetting after 12 h of irrigation on the day of the cut is shown for each soil in Figure 8. This represents one-half of the wetting pattern, so to attain adequate coverage, the horizontal spacing between driplines should be twice these values. Consequently, for the SCL spacing should be no more than 80 cm, for the CL no more than 90 cm, and for the L no more than 80 cm.

los suelos FAA, FA y F se muestra en las Figuras 2, 3 y 4, respectivamente. El contenido de humedad casi alcanza la saturación a 4 cm por encima del emisor para el suelo FAA, a 8 cm para el FA y a 5 cm para el F. Con esos contenidos de humedad, el suelo tiene poca o ninguna resistencia al esfuerzo cortante, por lo que los emisores de goteo deberán colocarse a una mayor profundidad para evitar rupturas debidas a la carga adicional del tractor. El Cuadro 3 muestra aumentos de la tensión a profundidades de hasta 50 cm por debajo de la superficie debidos a la carga del tractor.

Dado que la mayor tensión está cerca de la superficie, se utilizó la tensión en esa profundidad (10 cm)

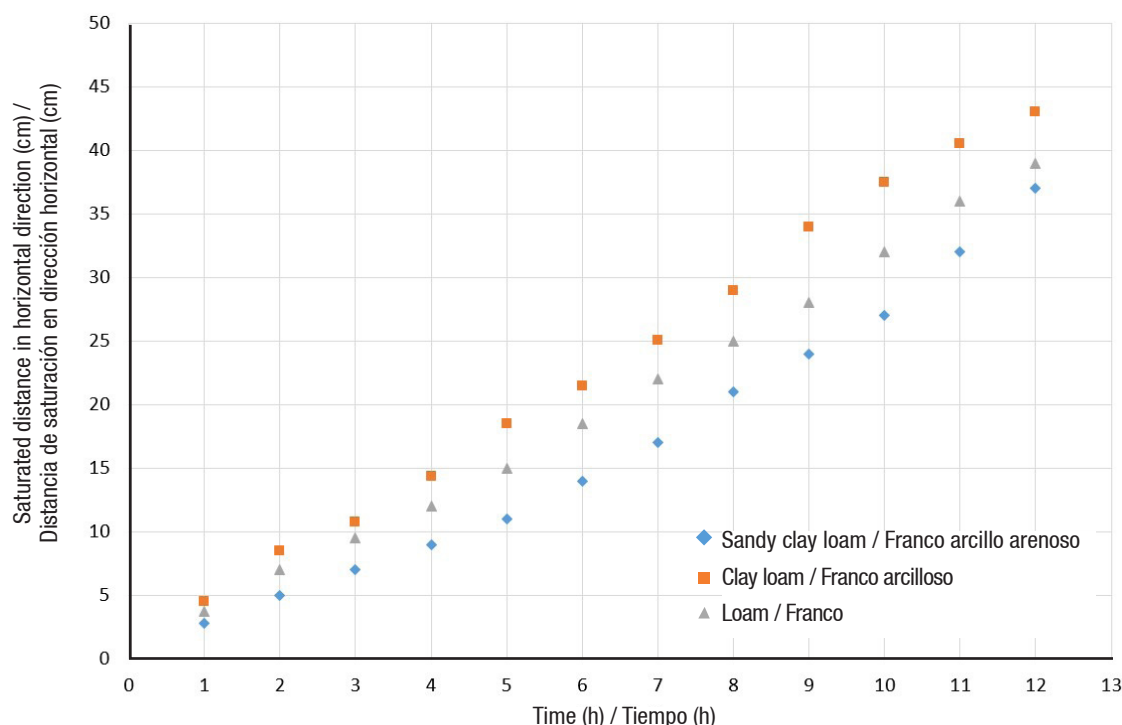


Figure 8. Horizontal extent of wetting for the three types of soil.

Figura 8. Extensión horizontal de mojado para los tres tipos de suelo.

Conclusions

The analysis presented in this paper describes how the HYDRUS-2D model can be used in combination with soil shear strength and soil stress analysis methods to calculate a minimum depth of placement of SDI tape to avoid soil failure due to added loads on the soil surface such as the load added by a tractor during the harvesting process. This methodology was also used to determine maximum horizontal spacing using wetted patterns generated by the model.

Based on the analysis in this study, minimum depth placement for a drip emitter with a flow rate of 0.68 lph would be 40 cm, 35 cm and 40 cm for the SCL, CL and L soils respectively in order to avoid shear failure due to a tractor with a weight of 3300 kg directly above the irrigation system. Maximum horizontal spacing for the soils was determined to be 80 cm for the SCL, 90 cm for the CL, and 80 cm L soils. These values can be rounded to 1 m, and they are the adequate spacing in order to supply the adequate amount of water to the root-zone, increase production and avoid striping presence in the plots.

Acknowledgments

The authors would like to thank Khaled Bali of the University of California Extension and Jairo Diaz, Director of the Desert Research and Extension Center

para desarrollar un círculo de ruptura de Mohr y su envolvente para cada tipo de suelo. La Figura 5 indica que es necesaria una fuerza cohesiva mínima de 14.70 kPa para evitar rupturas en el suelo FAA. De manera similar, la fuerza cohesiva mínima para el suelo FA y el F es de 17.65 y 15.69 kPa, respectivamente (Figuras 6 y 7).

En la Figura 1 se puede observar que una fuerza cohesiva de 14.70 kPa se produce con un contenido de humedad de aproximadamente 26.8 % para el suelo FAA, el cual se produce a 10 cm por encima del emisor (Figura 2). Por lo tanto, la profundidad mínima de instalación del sistema de RGS para este tipo de suelo es de 40 cm. De manera similar, la fuerza cohesiva de 17.65 kPa en suelo FA se produce con un contenido de humedad de 34.7 % (Figura 1), lo cual ocurre 15 cm por encima del emisor (Figura 3), y resulta en una profundidad mínima de colocación del sistema de RGS de 35 cm. Para el suelo F, el mismo análisis arroja una profundidad mínima de instalación de 40 cm.

Finalmente, en la Figura 8 se muestra la mayor longitud lateral de mojado después de 12 h de riego para cada suelo. Esto representa la mitad del patrón de mojado entre cintas, por lo que el espacio horizontal entre las cintas de goteo debe ser el doble de estos valores para lograr una cobertura adecuada. De esta manera, el espaciado para los suelos FAA y F no debería ser superior a 80 cm, y para el FA de 90 cm.

(DREC) at Holtville, California, for their cooperation, suggestions and for allowing us to have access to the subsurface drip irrigated alfalfa plots at DREC. We would also like to thank Pornweenus Khounsimma, Juan Gonzalez Cena and Jose Cisneros for their assistance in collecting field data.

End of English version

References / Referencias

- Alam, M., Trooien, T. P., Rogers, D. H., & Dumler, T. J. (2002). An efficient irrigation technology for alfalfa growers. *Journal of Extension*, 40(3), 1-11. Retrieved from <https://www.joe.org/joe/2002june/rb5.php>
- Alam, M., Trooien, T. P., Dumler, T. J., & Rogers, D. H. (2002b). Using subsurface drip irrigation for alfalfa. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(6), 1715-1721. doi: 10.1111/j.1752-1688.2002.tb04376.x
- Al-Karadsheh, E., Sourell, H., & Krause, R. (2002). Precision irrigation: new strategy irrigation water management. *Conference on International Agricultural Research for Development*. Retrieved from <http://www.tropentag.de/2002/abstracts/full/34.pdf>
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). (1996). *Standard methods: Soil and water terminology* (S526). Michigan: Author.
- Feddes, R. A., Kowalik, P., Kolinska-Malinka, K., & Zaradny, H. (1976). Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *Journal of Hydrology*, 31(1-2), 13-26. doi: 10.1016/0022-1694(76)90017-2
- Hough, B. K. (1969). *Basic soils engineering*. New York: The Ronald Press.
- Kandelous, M., Kamai, T., Vrugt, J., Simunek, J., Hanson, B., & Hopmans, J. (2012). Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfalfa. *Agricultural Water Management*, 109, 81-93. doi: 10.1016/j.agwat.2012.02.009
- Simunek, J., van Genuchten, M. T., & Sejna, M., (2006). *The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. Czech Republic: PC Progress.
- Simunek, J., van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587-600. doi: 10.2136/vzj2007.0077
- Simunek, J., & Hopmans, J. W. (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling*, 220(4), 505-521. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004

Conclusiones

El análisis presentado describe la manera en que el modelo HYDRUS-2D puede ser utilizado en combinación con métodos de análisis de resistencia al esfuerzo cortante y de estrés del suelo; esto con la finalidad de calcular la profundidad mínima de instalación de la cinta de RGS para evitar la ruptura del suelo debida a cargas añadidas en la superficie, como lo es el peso de un tractor durante el proceso de cosecha. Esta metodología también se utilizó para determinar el espaciado horizontal máximo entre cintas a partir de patrones de mojado horizontales generados por el modelo.

Con base en el análisis realizado, la profundidad mínima de instalación de un sistema de RGS, con un caudal de 0.68 lph, es de 40, 35 y 40 cm para los suelos FAA, FA y F, respectivamente, esto con el fin de evitar una ruptura por el esfuerzo cortante del suelo debida al paso de un tractor con peso aproximado de 3 300 kg. Además, el espaciamiento horizontal máximo entre cintas en los suelos FAA y F es de 80 cm, y para el FA de 90 cm. Estos valores pueden redondearse a 1 m, lo que genera un espaciamiento adecuado para suministrar la cantidad óptima de agua a la zona radicular, aumentar la producción y tener uniformidad en las parcelas (evitar la presencia de surcos).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Khaled Bali de la *University of California Extension* y a Jairo Díaz Director del *Desert Research and Extension Center (DREC)* en Holtville, California, por su cooperación, sugerencias y permisos para ingresar a las parcelas de alfalfa regadas con el sistema de riego por goteo subterráneo en el DREC. También agradecemos a Pornweenus Khounsimma, Juan González Cena y José Cisneros por su ayuda en la recolección de los datos de campo.

Fin de la versión en ingles

- Slack, D. C., & Liga, M. J. (2010). Modeling approach to determination of appropriate depth and spacing of subsurface drip irrigation tubing. *Proceedings of the International Conference on Technology and Innovation for Sustainable Development*.
- Taylor, S. A., & Ashcroft, G. M. (1972). *Physical edaphology*. San Francisco, California: Freeman and Co.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x