

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR LA EVAPORACIÓN EN SUELO DESNUDO COMPARADO CON DOS MÉTODOS CONVENCIONALES

DESIGN OF AN UNDERGROUND IRRIGATION SYSTEM TO DECREASE SOIL EVAPORATION, AS COMPARED WITH TWO CONVENTIONAL METHODS

Gregorio Lucero-Vega¹, Enrique Troyo-Diéguez^{1*}, Bernardo Murillo-Amador¹, Alejandra Nieto-Garibay¹, F. Higinio Ruíz-Espinoza², F. Alfredo Beltrán-Morañes², Sergio Zamora-Salgado²

¹Programa de Agricultura en Zonas Áridas, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Calle Instituto Politécnico Nacional 195. 23096. La Paz, Baja California Sur, México. (etroyo04@cibnor.mx). ²Departamento de Agronomía, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al Sur, Km. 5.5. 23080. La Paz, Baja California Sur, México.

RESUMEN

El sistema de riego subterráneo es una alternativa para incrementar la productividad del agua en la agricultura, en virtud de que minimiza la evaporación superficial e incrementa la eficiencia de aportación hídrica en zona de raíz. El objetivo de este estudio fue evaluar la cantidad de agua perdida por evaporación en tres sistemas de riego, dos de ellos mediante aporte superficial y un sistema de riego subterráneo. Tres sistemas de riego se evaluaron en septiembre de 2015 y enero de 2016, mediante riego localizado en zanjas (RZ), riego subterráneo por difusores (RSD) y riego por goteo con cinta (RGC). El sistema RZ fue 1 m de zanja con 15 cm de profundidad. El RSD fue un tubo de PVC sanitario de 5.08 cm de diámetro interior y 1 m de longitud con ranuras laterales cada 8.2 cm, colocado horizontalmente a 20 cm de profundidad, el cual se expone a la superficie del suelo mediante un codo y segmento de tubo de 30 cm de longitud del mismo diámetro. El difusor se rellena con gravilla de 3 a 7 mm para evitar el ingreso de partículas finas. El RGC fue 1 m de cinta de riego con goteros de 1.1 L h⁻¹ cada 20 cm. Para medir la humedad y evaporación se aplicaron 10 L a cada sistema de riego. Las muestras de 150 g de suelo se tomaron a profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm; la humedad se determinó con el método gravimétrico, el primer muestreo se realizó 15 min después del riego y los siguientes a 24, 72 y 120 h. El sistema RSD mostró la menor evaporación; la diferencia entre RSD y RZ fue 30 % en 2015 y 41 % en 2016; la diferencia entre RSD y RGC fue 44 %, similar en ambas fechas.

Palabras clave: irrigación, aporte hídrico, riego sub-superficial.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2016. Aprobado: diciembre, 2016.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 487-505. 2017.

ABSTRACT

The underground irrigation system is an alternative to increase water productivity in agriculture since it minimizes surface evaporation and increases water supply efficiency in the root zone. The objective of this study was to evaluate the amount of water lost by evaporation in three irrigation systems, two of them through surface supply and an underground irrigation system. Three irrigation systems were evaluated in, September 2015 and January 2016, by irrigation located in ditches (RZ), underground irrigation by diffusers (RSD) and drip irrigation with tape (RGC). The RZ system consisted of 1 m of ditch with 15 cm deep. The RSD was a sanitary PVC pipe of 5.08 cm inner diameter and 1 m long with side grooves located every 8.2 cm, placed horizontally at 20 cm deep, which is exposed to the ground surface by means of an elbow and tube segment of 30 cm long and the same diameter. The diffuser is filled with gravel from 3 to 7 mm to prevent ingress of fine particles. The RGC was 1 m of drip irrigation tape of 1.1 L h⁻¹ every 20 cm. To measure moisture and evaporation, 10 L were applied to each irrigation system. We took samples of 150 g of soil at depths of 0 to 5, 5 to 10, 10 to 15 and 15 to 20 cm; moisture was determined with the gravimetric method, the first sampling was performed 15 min after irrigation and the following samples 24, 72 and 120 h. The RSD system showed the lowest evaporation; the difference between RSD and RZ was 30 % in 2015 and 41 % in 2016; the difference between RSD and RGC was 44 %, similar in both dates.

Key words: irrigation, water supply, sub-surface irrigation.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego subterráneos se originaron como una alternativa para mitigar los problemas de drenaje y pérdidas por altas tasas de evaporación del agua de riego, cuya investigación formal inició en California, EUA, hace más de 30 años (Ayars *et al.*, 2015). Ahora hay varios tipos de riego subterráneo, tecnología desarrollada para disminuir la evaporación directa del suelo y lograr el máximo control sobre el contenido de humedad en la zona más activa de la raíz. De esta forma se obtiene un ahorro considerable del agua para riego, aspecto importante porque la mayor limitante para la producción agrícola en zonas áridas es la disponibilidad de agua (Montemayor *et al.*, 2012). En el mundo, 72 % del agua disponible se destina a la agricultura mediante diversos sistemas de riego (FAO, 2007), y el riego por goteo subterráneo (RGS) enfrenta varios problemas técnicos, entre los que destacan la obstrucción o taponamiento por partículas finas o materia orgánica y el daño por roedores (Payero *et al.*, 2005).

Según Molden *et al.* (2010), existe un margen amplio para mejorar la productividad del agua en los cultivos, con sistemas de riego que puedan implementarse, como el riego suplementario, riego deficitario, riego de precisión, cultivos hidropónicos, acuaponía, riego con coberturas, invernaderos, prácticas de conservación de suelo-agua y riego subterráneo. La aplicación de residuos orgánicos o coberturas tipo mulch, consistente en rastrojo de arroz sobre la superficie del suelo donde se ubica la manguera de goteo, es satisfactoria en el cultivo de uva y aumenta el uso eficiente del agua (Zhang *et al.*, 2014).

Respecto al RGS, Ayars *et al.* (1999) después de 15 años de investigación reportan un aumento significativo en el rendimiento y eficiencia en el uso de agua en algodón, maíz y melón. Además, el mismo sistema mantiene la superficie de suelo seca, lo cual contribuye de manera significativa al control de plantas arvenses, reduce la lixiviación de NO_3 comparado con el riego superficial y se obtienen mayores rendimientos, porque el agua y nutrientes llegan a la parte más activa de la zona de raíces (Thompson *et al.*, 2009). Según Camp *et al.* (1993), la instalación de mangueras para micro-irrigación debajo de la zona de labranza y con amplio espaciamiento hace más rentable el riego suplementario de hortalizas. En Brasil, Dos Santos *et al.* (2016) realizaron un experimento

INTRODUCTION

Underground irrigation systems originated as an alternative to mitigate drainage problems and losses due to high rates of evaporation of irrigation water, whose formal research began in California, USA, more than 30 years ago (Ayars *et al.*, 2015). Now there are several types of underground irrigation, technology developed to reduce soil direct evaporation and achieve maximum control over the moisture content in the most active area of the root. In this way, a considerable saving of water for irrigation is obtained, an important aspect because the main constraint for agricultural production in arid zones is the availability of water (Montemayor *et al.*, 2012). In the world, 72 % of the available water is destined to agriculture through various irrigation systems (FAO, 2007), and underground drip irrigation (RGS) faces several technical problems, including fine particle obstruction or clogging or by organic matter and damage by rodents (Payero *et al.*, 2005).

According to Molden *et al.* (2010), there is a wide margin to improve water productivity in crops, with irrigation systems that can be implemented, such as supplementary irrigation, deficit irrigation, precision irrigation, hydroponic crops, aquaponics, irrigation with cover crops, greenhouses, soil-water conservation practices and underground irrigation. The application of organic residues or mulch-type covers, consisting of rice stubble on the soil surface where the drip hose is located, is satisfactory in grape crops and enhances the efficient use of water (Zhang *et al.*, 2014).

Regarding RGS, Ayars *et al.* (1999), after 15 years of research, report a significant increase in yield and efficiency in the use of water in cotton, maize and melon. In addition, the same system maintains soil surface dry, which contributes significantly to the control of arable plants, reduces NO_3 leaching compared to surface irrigation and higher yields are obtained because water and nutrients reach the most active root zone part (Thompson *et al.*, 2009). According to Camp *et al.* (1993), the installation of micro-irrigation hoses under the tillage area and with wide spacing makes the additional irrigation of vegetables more profitable. In Brazil, Dos Santos *et al.* (2016) conducted an experiment in sugarcane cultivation with underground irrigation systems

en cultivo de caña de azúcar con sistemas de riego subterráneo donde la línea regante estuvo a 0.20 y 0.40 m de profundidad; este sistema RGS instalado a 0.20 m proporcionó las mejores condiciones de contenido de humedad en las capas del suelo, lo cual favorece un adecuado equilibrio de agua y oxígeno en las raíces. En México, un sistema de riego subterráneo ahorró 27.4 % de agua de riego, comparado con uno superficial (Montemayor *et al.* (2006).

Por lo anterior y con los resultados de las investigaciones citadas, el objetivo de nuestro estudio fue evaluar la cantidad de agua que se pierde por evaporación en tres sistemas de riego, dos de ellos mediante aporte superficial y un sistema de riego subterráneo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental

El experimento se realizó en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C (CIBNOR) en el Comitán, Baja California Sur, México, a 17 km al oeste de la Ciudad de La Paz, en 24° 8' 9.47" N y 110° 25' 41.35" O. El experimento se realizó en dos períodos en el mismo sitio; el primero fue del 24 al 29 de septiembre de 2015 y el segundo del 18 al 23 de enero de 2016. Tres sistemas de riego en campo abierto (Montemayor *et al.* (2006) se usaron para evaluar la evaporación directa de suelo desnudo con dos sistemas superficiales y uno subterráneo. El diseño experimental fue completo al azar con arreglo en franjas, con tres tratamientos y tres repeticiones, donde cada repetición corresponde a 1 m de longitud. La separación entre sistemas de riego fue 2 m y entre repeticiones 1 m (Figura 1).

Clima de la zona de estudio

El clima es de zonas áridas, la clasificación climática según García (2004) es BW(h')w, el cual corresponde a un clima muy seco, cálido, con lluvias en verano. Las normales climatológicas indican una temperatura máxima mensual de 39.8 °C en agosto, mínima de 11.2 °C en enero y promedio anual de 23.7 °C; la evaporación potencial máxima mensual es 248.3 mm en julio, mínima 96.0 en diciembre y acumulada anual 2084.5 mm. La precipitación total anual es 169.2 mm, con máximos 37.2 y 58.4 mm en agosto y septiembre, respectivamente (SMN, 2016).

Instalación de sistemas de riego

La separación entre líneas regantes o emisores fue 1 m y la separación entre los sistemas de riego fue de 2 m. El riego se

where the irrigation line was 0.20 and 0.40 m deep; this RGS system installed at 0.20 m provided the best moisture content conditions in the soil layers, which favors an adequate balance of water and oxygen in the roots. In Mexico, an underground irrigation system saved 27.4 % of irrigation water, compared to a surface one (Montemayor *et al.* (2006).

On this account and based on the results of the aforementioned researches, the objective of our study was to evaluate the amount of water that is lost by evaporation in three irrigation systems, two of them through surface irrigation and an underground irrigation system.

MATERIALS AND METHODS

Description of the experimental site

The experiment was conducted at the Experimental Agricultural Field of the Center for Biological Research of Northwest Mexico (CIBNOR) in the Comitán, Baja California Sur, Mexico, 17 km west of the City of La Paz, at 24° 8' 9.47" N, and 110° 25' 41.35" W. The experiment was performed in two periods at the same site; the first was from 24 to 29 September 2015 and the second from 18 to 23 January 2016. Three open field irrigation systems (Montemayor *et al.* (2006) were used to evaluate the direct evaporation of bare soil with two surface systems and one underground. The experimental design was completely randomized set in strips, with three treatments and three replicates, where each repetition corresponds to 1 m length. The separation between irrigation systems was 2 m and between replicates 1 m (Figure 1).

Climate of the study area

The climate is arid, the climatic classification according to García (2004) is BW (h') w, which corresponds to a very dry and warm climate, with rains in summer. Climatic conditions indicate a maximum monthly temperature of 39.8 °C in August, minimum of 11.2 °C in January and annual average of 23.7 °C; the maximum monthly evaporation potential is 248.3 mm in July, minimum 96.0 in December and annual accumulated 2,084.5 mm. The total annual precipitation is 169.2 mm, with maximum 37.2 and 58.4 mm in August and September, respectively (SMN, 2016).

Installation of irrigation systems

The separation between irrigation lines or emitters was 1 m and the separation between the irrigation systems was 2 m.

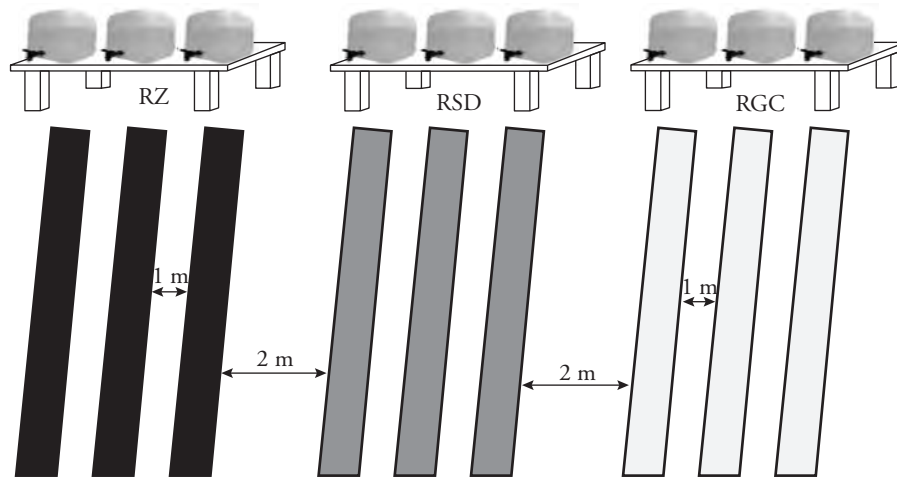


Figura 1. Croquis de instalación espacial de tres sistemas de riego en el Campo Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste; La Paz, Baja California Sur, México.

Figure 1. Spatial installation sketch of three irrigation systems in the Experimental Field of the Center for Biological Research of Northwest Mexico; La Paz, Baja California Sur, Mexico.

proporcionó añadiendo agua a un depósito instalado sobre una plataforma colocada a 1 m de altura, de donde se distribuyó a través de una manguera conectada a cada emisor. En la Figura 2 se muestran los tres sistemas después del primer riego.

Irrigation was provided by adding water to a reservoir installed on a platform placed 1 m high, from where it was distributed through a hose connected to each emitter. Figure 2 shows the three systems after the first irrigation.

Riego localizado en zanjas (RZ)

Irrigation located in ditches (RZ)

El primer sistema de riego fue 1 m de zanja o surco con pendiente de 0.5 %; el interior de la zanja se trazó en forma de

The first irrigation system was 1 m of trench or groove with a 0.5 % slope; the interior of the trench was traced in the form of



Figura 2. (A) Sistema de riego localizado en zanjas (RZ), (B) sistema de riego subterráneo por difusores (RSD), (V) sistema de riego por goteo con cinta (RGC).

Figure 2. (A) Irrigation system located in ditches (RZ), (B) underground irrigation system by diffusers (RSD), (V) drip irrigation system with tape (RGC).

triángulo con taludes de 19.6 cm, tirante de 5.0 cm y 38 cm en la parte superior, que es la base del triángulo. El agua se aplicó en la parte más alta de la zanja mediante un micro tubo de PVC negro de 3 mm de diámetro interior y 5 mm de diámetro exterior, el cual aportó un caudal de 12 L h⁻¹. El sistema RZ simula el riego por goteo convencional realizado con goteros tipo botón (goteros independientes), en el cual los agricultores usan una manguera lisa de 16 a 20 mm de diámetro interior donde colocan goteros con separaciones que ellos deciden, por lo común con 3 a 4 emisores por árbol (Figura 2A).

Riego subterráneo por difusores (RSD)

Para el sistema de riego RSD se instaló un tubo de PVC sanitario de 5.08 cm de diámetro interior y 1 m de longitud, colocado horizontalmente a 20 cm de profundidad. En uno de los extremos del tubo se coloca un tapón con una ranura vertical de 4 cm y en el otro extremo se acopla un codo sanitario de 90° del mismo diámetro para conectar la sección subterránea del difusor horizontal con la superficie del suelo y la atmósfera mediante un segmento de tubo de 30 cm de longitud del mismo tipo y diámetro. A través del segmento del difusor expuesto se aporta agua mediante un micro tubo de 3 mm de diámetro interior (Figura 2B). El segmento horizontal del difusor mide 1 m de longitud y tiene ranuras de 4 cm cada 8.2 cm en ambos lados, de manera que al colocarlo en el suelo las ranuras se exponen de forma vertical; desde el punto de vista hidráulico, la parte inferior del tubo funciona en forma de canal. Para su operación, el interior del tubo se llena con gravilla de 3 a 7 mm de diámetro para favorecer el flujo de agua e impedir el ingreso de partículas de suelo finas al difusor. El sistema RSD se compara con sistemas de riego convencionales para mostrar sus ventajas al minimizar la evaporación directa del suelo.

Riego por goteo con cinta (RGC)

El tercer sistema de riego (RGC) fue un segmento de 1 m de cinta de riego marca Netafim® modelo Streamline 16060 con goteros cada 20 cm fabricados para un flujo máximo de 1.1 L h⁻¹. El caudal por gotero se calibró en 0.40 L h⁻¹, menor al caudal nominal debido a que la presión proporcionada a la cinta de riego fue de 1 m de columna de agua (MCA) equivalente a 0.1 kg cm⁻² (1.42 PSI), la cual es menor a la presión nominal, indicada en 10 MCA. Este método simula el sistema de riego por goteo con cinta, que es el sistema más usado por los agricultores que tienen riego presurizado y utilizan cintas o manguera con goteros instalados equidistantemente (Figura 2C).

Para relacionar la evaporación de agua directa del suelo con los elementos del clima, en ambos períodos del experimento se

a triangle with slopes of 19.6 cm, 5.0 cm strap and 38 cm at the top, which is the base of the triangle. Water was applied in the highest part of the trench by means of a micro-tube of black PVC of 3 mm in internal diameter and 5 mm in external diameter, which contributed a flow of 12 L h⁻¹. The RZ system simulates the conventional drip irrigation applied with buttonhole drippers (independent drippers), in which farmers use a smooth hose of 16 to 20 mm in internal diameter where they place drippers with separations set by them, usually with 3 to 4 emitters per tree (Figure 2A).

Underground irrigation by diffusers (RSD)

For the RSD irrigation system, a sanitary PVC pipe with a 5.08 cm inner diameter and 1 m length was placed horizontally at 20 cm depth. At one end of the tube we placed a plug with a vertical 4 cm slot, and on the other end a 90° sanitary elbow of the same diameter was attached to connect the underground section of the horizontal diffuser with the soil surface and the atmosphere by means of a tube segment 30 cm long of the same type and diameter. Through the exposed diffuser segment water was supplied through a 3 mm inner diameter tube (Figure 2B). The horizontal segment of the diffuser was 1 m long and had 4 cm slots every 8.2 cm on both sides, so that when placed on the floor the slots are exposed vertically; from the hydraulic point of view, the lower part of the tube functions as a channel. For its operation, the interior of the tube is filled with gravel of 3 to 7 mm in diameter to favor the water flow and prevent the entrance of fine soil particles to the diffuser. The RSD system is compared to conventional irrigation systems to show its advantages on minimizing direct soil evaporation.

Drip irrigation with tape (RGC)

The third irrigation system (RGC) was a segment of 1 m of Netafim® model streamline tape 16060 with drippers every 20 cm made for a maximum flow of 1.1 L h⁻¹. The dropper flow rate was calibrated at 0.40 L h⁻¹, lower than the nominal flow rate because the pressure provided to the irrigation belt was 1 m of water column (MCA) equivalent to 0.1 kg cm⁻² (1.42 PSI), which is less than the nominal pressure, indicated in 10 MCA. This method simulates the system of drip irrigation with tape, which is the most used by farmers who have pressurized irrigation, who use tapes or hose with drippers installed equidistantly (Figure 2C).

In order to relate the direct water evaporation of the soil with the elements of the climate, we recorded data of ambient temperature, soil and potential evaporation (Eo) with type "A" evaporimeter in both periods of the experiment. The climate

tomaron datos de temperatura ambiental, del suelo y la evaporación potencial (E_o) con evaporímetro tipo "A". Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica automática marca Davis® modelo Vantage Pro2 (EUA), instalada en el Campo Agrícola Experimental del CIBNOR. La temperatura de suelo se tomó con un termómetro digital portátil marca Yokogawa® modelo 2455 (Japón), el cual tiene un dispositivo electrónico que interpreta la señal que emite un sensor tipo termopar soportado por una varilla de acero inoxidable de 4.8 mm de diámetro.

Después de instalar los sistemas de riego se proporcionó un riego de 10 L m^{-1} para humedecer el suelo a capacidad de campo (CC); al considerar una distancia de un metro entre surcos, dicho volumen unitario corresponde a una lámina de riego de 10 mm (equivalente a $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). La primera muestra de suelo se tomó 15 min después del riego y la segunda se tomó 24 h después. Al terminar el segundo muestreo se realizaron dos muestreos adicionales cada dos días, para un total de cuatro muestreos. Este proceso fue similar en ambas fechas, septiembre de 2015 y enero de 2016.

Muestreo del suelo

Para tomar muestras de suelo se usó una barrena de media caña (Figura 3) con la cual se extrae un núcleo de suelo de 2.5 cm de diámetro, lo que permite separar la muestra en fracciones de 5 cm; cada sección de la muestra se colocó en un frasco de vidrio pesado y etiquetado. Cada muestreo se realizó a profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm para determinar el contenido de humedad; se obtuvieron 4 muestras por repetición y 12 por tratamiento, para un total de 36 muestras por fecha de muestreo. Después de cada muestreo se obtuvo el porcentaje de humedad de cada muestra por medio del método gravimétrico, el cual consiste en pesar la muestra húmeda, secarla en estufa por 24 h a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, pesar la muestra seca y obtener el porcentaje de humedad tomando como referencia el peso del suelo seco. Mediante este proceso se determinó el porcentaje de humedad de cada sistema de riego y repetición.

Caracterización del suelo

La textura del suelo se determinó con analizador laser marca Horiba (Japón), según el método de granulometría descrito por Lewis (1984); la materia orgánica (MO) se cuantificó con el método AS-07 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), según Walkley y Black (1934); el pH se determinó mediante el método AS-02, y la conductividad eléctrica (CE) por el método AS-18 de la citada NOM. La capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (D_a) se determinaron según los métodos sugeridos por Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio (1990).

data were obtained from a Davis® automatic weather station model Vantage Pro2 (USA), installed in the Experimental Agricultural Field of CIBNOR. Soil temperature was taken with a Yokogawa® portable digital thermometer model 2455 (Japan); this instrument has an electronic device that interprets the signal emitted by a thermocouple type sensor supported by a stainless steel rod of 4.8 mm in diameter. After installing the irrigation systems, irrigation of 10 L m^{-1} was applied to moisten the soil at field capacity (CC); when considering a distance of one meter between furrows, this unit volume corresponds to an irrigation sheet of 10 mm (equivalent to $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). The first soil sample was taken 15 min after irrigation and the second sample was taken 24 h later. At the end of the second sampling, two additional samplings were performed every two days, for a total of four samplings. This process was similar on both dates, September 2015 and January 2016.

Soil sampling

To take soil samples, a half-auger bit (Figure 3) was used to extract a 2.5 cm diameter soil core, which allows the sample to be separated into 5 cm fractions; each section of the sample was placed in a heavy, labeled glass jar. Each sampling was



Figura 3. Barrena de media caña.

Figure 3. Half-auger bit soil characterization.

Determinación de la humedad en el suelo

El contenido de agua expresado en L por profundidad para cada sistema de riego fue calculado a partir de los datos de porcentaje de humedad y densidad aparente del suelo, para ello se tomó en cuenta la forma del bulbo húmedo (Figuras 4, 5 y 6). Las imágenes se digitalizaron con las mediciones realizadas en campo, para lo cual se utilizó el programa Autocad 2005 (Yarwood, 2005). Con dichas imágenes se obtuvo un gráfico de contorno del bulbo húmedo fraccionado por aéreas de igual porcentaje de humedad. (Copiar figuras 4, 5 y 6 adjuntas).

Análisis estadísticos

Los datos de pérdida de humedad se analizaron estadísticamente con el programa Excel 2007 y se usó ANDEVA de una vía mediante el programa PAST (Hammer, 2001). Las diferencias entre medias de tratamientos fueron determinadas mediante la diferencia mínima significativa (DMS) con $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo del área de estudio es de textura arenosa franca, con 81.6, 17.5 y 0.9 % de arena, limo y arcilla. El perfil de 0 a 40 cm consiste en un suelo con contenido 0.7 % MO, pH alcalino 8.8, CE 0.4 dS m^{-1} y Da 1.40 g cm^{-3} ; los valores de CC y PMP fueron 13 y 4 %, respectivamente.

La evaporación potencial (E_o) para la primera y segunda fecha fue 6.32 y 2.82 mm d^{-1} , respectivamente.

performed at depths of 0 to 5, 5 to 10, 10 to 15 and 15 to 20 cm to determine the moisture content; 4 samples were obtained per replicate and 12 samples per treatment, for a total of 36 samples per sampling date. After each sampling, the moisture content of each sample was obtained by means of the gravimetric method, which consists of weighing the wet sample, drying it in an oven for 24 h at 105° C, weighing the dry sample and obtaining the humidity percentage taking as reference the weight of dry soil. Through this process we determined the percentage of humidity of each system of irrigation and repetition.



Figura 5. Bulbo húmedo en el sistema RSD.

Figure 5. Wet bulb in the RSD system.



Figura 4. Bulbo húmedo en el sistema RZ.

Figure 4. Wet bulb in the RZ system.



Figura 6. Bulbo húmedo en el sistema RGC.

Figure 6. Wet bulb in the RGC system.

El contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje se muestra en los Cuadros 1 y 2. Los resultados corresponden a cuatro profundidades y cuatro fechas, para cada experimento; en la parte inferior de cada cuadro se muestra la pérdida de humedad acumulada en los períodos observados. La evaporación del suelo desnudo después del primer riego ocurrió con mayor intensidad durante las primeras 24 h y después disminuyó de manera paulatina (Figuras 7 y 8).

Debido a que el bulbo húmedo es dinámico, su forma geométrica y contenido de humedad cambian gradualmente a medida que el suelo pierde agua, por

Soil characterization

The soil texture was determined using the Horiba (Japan) laser analyzer according to the grain size method described by Lewis (1984); the organic matter (OM) was quantified using the AS-07 method of the Official Mexican Standard NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), according to Walkley and Black (1934); the pH was determined using the AS-02 method, and electrical conductivity (EC) by the AS-18 method of the aforementioned NOM. The field capacity (FC), permanent wilt point (PMP), and bulk density (Da) were determined according to the methods suggested by Ortiz-Villanueva and Ortiz-Solorio (1990).

Cuadro 1. Porcentaje de humedad del suelo, a cada profundidad, sistema de riego y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 24 a 29 de septiembre de 2015.

Table 1. Percentage of soil moisture at each depth, irrigation system and date, with accumulated moisture loss; 24-29 September 2015.

Profundidad 0-5 cm	RZ	RSD	RGC	Profundidad 5 a 10 cm	RZ	RSD	RGC
24-sep	20.40	1.02	17.83	24-sep	18.30	10.66	17.00
25-sep	10.67	0.92	9.67	25-sep	13.38	8.72	12.04
27-sep	9.22	1.11	7.27	27-sep	11.60	7.88	9.77
29-sep	6.84	1.01	5.52	29-sep	10.54	7.56	8.67
Pérdida de humedad	13.56	0.01	12.32	Pérdida de humedad	7.76	3.10	8.34
Profundidad 10 a 15 cm	RZ	RSD	RGC	Profundidad 15 a 20 cm	RZ	RSD	RGC
24-sep	17.27	14.15	14.49	24-sep	13.07	17.17	12.62
25-sep	12.89	10.94	11.76	25-sep	12.38	12.69	11.46
27-sep	11.45	9.61	9.96	27-sep	11.35	10.65	9.43
29-sep	10.68	9.05	9.42	29-sep	10.42	10.14	9.42
Pérdida de humedad	6.59	5.10	5.08	Pérdida de humedad	2.64	7.03	3.20

Cuadro 2. Contenido de humedad del suelo a cada profundidad, tratamiento y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 18 a 23 de enero de 2016.

Table 2. Soil moisture content at each depth, treatment and date, with accumulated moisture loss; 18-23 January 2016.

Profundidad 0 a 5 cm	RZ	RSD	RGC	Profundidad 5 a 10 cm	RZ	RSD	RGC
18-enero	20.27	1.02	17.84	18-enero	18.25	10.61	17.09
19-enero	10.48	1.03	9.91	19-enero	11.78	7.67	11.72
21-enero	8.89	1.07	8.16	21-enero	11.02	7.48	10.10
23-enero	7.44	1.05	5.90	23-enero	9.56	6.04	8.95
Pérdida de humedad	12.83	-0.03	11.94	Pérdida de humedad	8.69	4.57	8.14
Profundidad 10 a 15 cm	RZ	RSD	RGC	Profundidad 15 a 20 cm	RZ	RSD	RGC
18-enero	17.30	13.94	14.57	18-enero	12.88	17.30	12.68
19-enero	12.17	10.44	12.06	19-enero	9.86	11.82	11.40
21-enero	10.76	9.39	10.43	21-enero	8.34	10.89	10.24
23-enero	10.05	8.92	9.53	23-enero	8.17	9.61	9.03
Pérdida de humedad	7.25	5.02	5.04	Pérdida de humedad	4.71	7.69	3.65

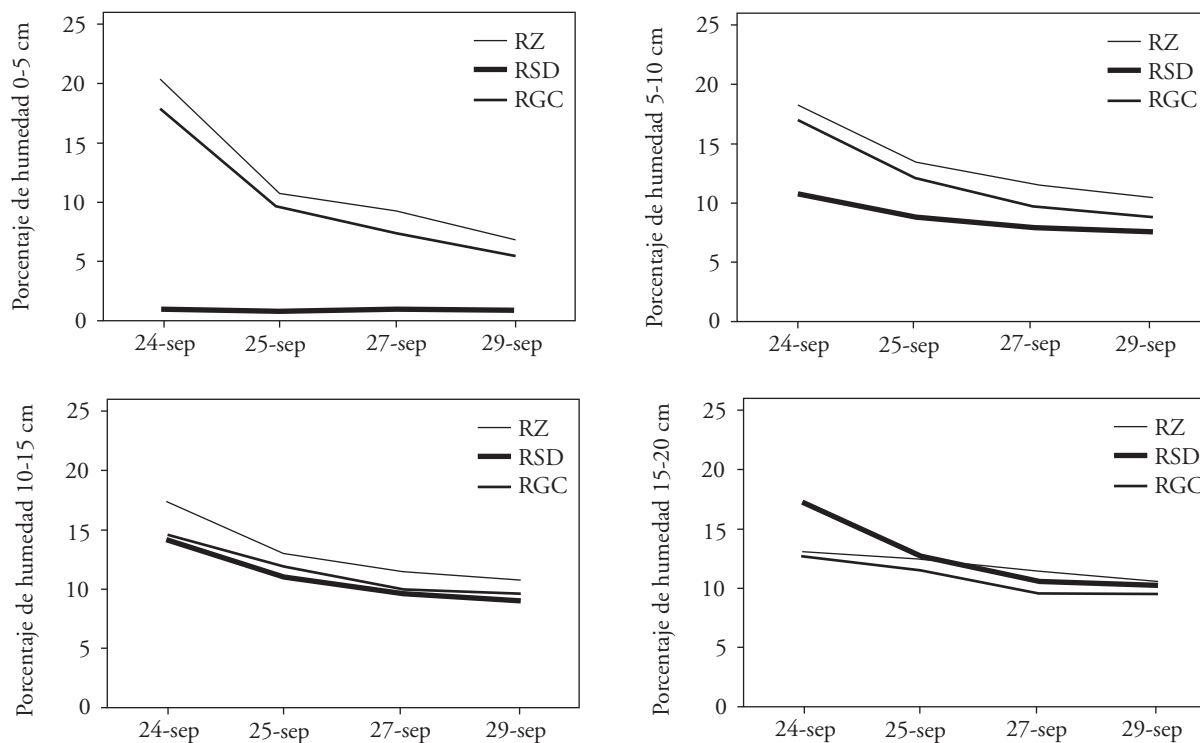


Figura 7. Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 24 a 29 de septiembre de 2015.

Figure 7. Percentage of soil moisture at four depths after applying 10 L per m in each experimental unit; 24-29 September 2015.

lo cual las imágenes fueron diferentes para cada día de muestreo. La lámina evaporada para cada sistema de riego evaluado durante el experimento se calculó considerando una distancia entre líneas regantes de 1 m (Figuras 9 y 10).

Al estimar la evaporación del suelo desnudo en relación a la evaporación potencial tomando como referencia el área del bulbo húmedo, se encontró que la evaporación fue mayor durante las primeras 24 h después del riego, la cual corresponde al 85 % de la evaporación potencial en el sistema de RZ, 50 % para el RSD y 90 % para el RGC. Además, los porcentajes fueron similares en ambas fechas del experimento (septiembre de 2015 y enero de 2016). Al expresar la evaporación en $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ y considerando una distancia de 1 m entre surcos, para el periodo del 24 al 29 septiembre de 2015 se observa que durante las primeras 24 h la evaporación fue $22.80 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ en el sistema RZ, 15.10 en RSD y 30.30 en RGC. Debido a que la pérdida por evaporación disminuyó paulatinamente hasta el último día observado, la evaporación entre el día 4 y 5 posterior al riego fue $3.75 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ para RZ, 2.95 para RSD y 3.10 para RGC. En el periodo del

Determination of soil moisture

The water content expressed as L per depth for each irrigation system was calculated from the soil moisture and bulk density percentage data. To this end, we took into account the wet bulb shape (Figures 4, 5 and 6). The images were digitized with the measurements made in the field, for which we used the program Autocad 2005 (Yarwood, 2005). With these images we obtained a graph of contour of the humid bulb fractionated by air of equal humidity percentage.

Statistical analysis

The moisture loss data were statistically analyzed using the Excel 2007 program and we used the one-way ANDEVA with the PAST program (Hammer, 2001). The differences between means of treatments were determined using the least significant difference (DMS) with $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

The soil of the study area is of a sandy loamy texture, with 81.6, 17.5 and 0.9 % of sand, silt

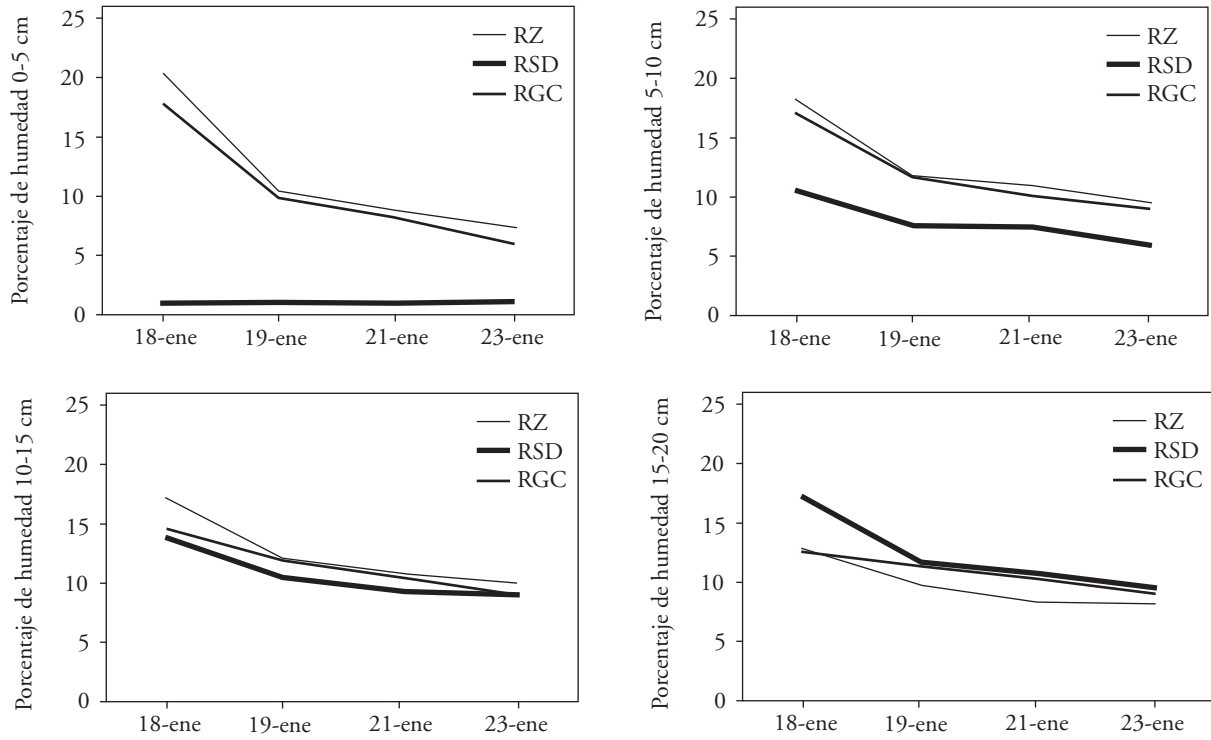


Figura 8. Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 18 a 23 de enero de 2016.

Figure 8. Percentage of moisture in the soil at four depths after applying 10 L per m in each experimental unit; 18-23 January 2016.

18 al 23 de enero de 2016, durante las primeras 24 h posteriores al riego la evaporación fue 13.3 m³ ha⁻¹ en RZ, 8.0 en RSD y 14.5 en SRG. Después, la pérdida por evaporación para el último día observado

and clay. The 0 to 40 cm profile consists of a soil containing 0.7% OM, 8.8 alkaline pH, CE 0.4 dS m⁻¹ and Da 1.40 g cm⁻³; the values of FC and PMP were 13 and 4%, respectively.

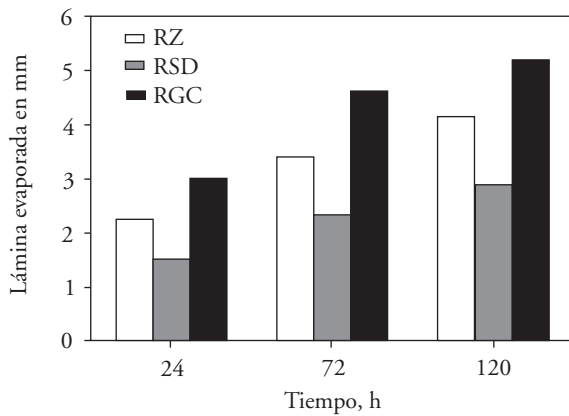


Figura 9. Evaporación acumulada (mm) en tres sistemas de riego (2015).

Figure 9. Cumulative evaporation (mm) in three irrigation systems (2015).

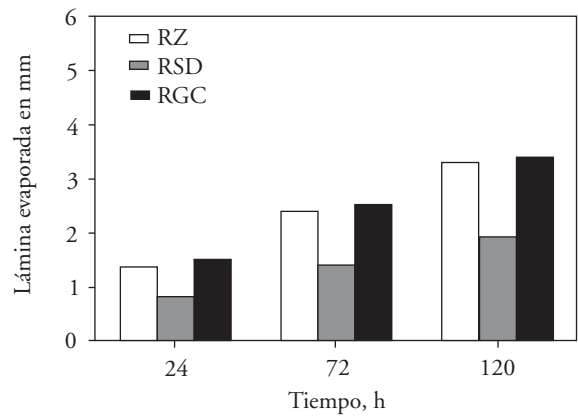


Figura 10. Evaporación acumulada (mm) en tres sistemas de riego (2016).

Figure 10. Cumulative evaporation (mm) in three irrigation systems (2016).

entre el día 4 y 5 después del riego, fue 4.45 m³ ha⁻¹ para RZ, 2.50 para RSD y 4.40 para RGC, lo cual se muestra en el Cuadro 3.

En todos los casos la pérdida por evaporación fue menor en el RSD, la diferencia entre el RSD y RZ fue 30 % en septiembre de 2015 y 41 % en enero de 2016. La diferencia entre RSD y RGC fue 44 %, y el resultado fue semejante en ambos períodos de experimentación. Estos datos son similares a los de Meshkat *et al.* (2000), quienes compararon el RGC con un sistema de goteo subterráneo que consistió en colocar un tubo en el suelo, sacar el núcleo de suelo y rellenarlo con arena gruesa, lo cual permitió colocar el agua bajo la superficie, y la diferencia de evaporación entre el sistema superficial y el subterráneo fue 39.8 %. Montemayor *et al.* (2006) usaron maíz forrajero para comparar riego por goteo superficial y subterráneo, y encontraron que el riego subterráneo da un ahorro de 27.4 %. Este resultado es inferior al encontrado en nuestra investigación y también al reportado por Meshkat *et al.* (2000). Tal diferencia puede obedecer a que el cultivo de maíz proyecta sombra sobre la superficie del suelo, lo que favorece la disminución de la evaporación directa del suelo, efecto más marcado en las últimas etapas del cultivo. Godoy *et al.* (2005) compararon el riego por goteo subterráneo con 6 laterales por cada línea de árboles contra riego por gravedad (inundación) en nogal pecanero, en Matamoros, Coahuila, y reportan 30.6 % de ahorro del volumen de agua respecto al sistema subterráneo.

La distribución del agua en el perfil del suelo por capas se muestra en las Figuras 11 y 12, para cada sistema de riego durante el periodo observado (120 h después del riego). La mayor cantidad de agua en el suelo se depositó en las primeras capas, de 0 a 10 cm,

The potential evaporation (E_o) values for the first and second dates were 6.32 and 2.82 mm d⁻¹, respectively. The soil moisture content expressed as a percentage is shown in Tables 1 and 2, where the results correspond to four depths and four dates for each experiment. The accumulated moisture loss in the periods observed appears at the bottom of each table. The evaporation of bare soil after the first irrigation occurred with greater intensity during the first 24 h and then gradually decreased (Figures 7 and 8).

Because the wet bulb is dynamic, its geometric shape and moisture content gradually change as the soil loses water, so the images were different for each day of sampling. The evaporated sheet for each irrigation system evaluated during the experiment was calculated considering a distance between water lines of 1 m (figures 9 and 10).

When estimating bare soil evaporation relative to potential evaporation taking as reference the wet bulb area, we found that evaporation was greater during the first 24 h after irrigation, which corresponds to 85 % of the potential evaporation in the RZ system, 50 % for RSD, and 90 % for RGC. In addition, the percentages were similar in both dates of the experiment (September 2015 and January 2016). When evaporation was expressed in m³ h⁻¹ and considering a distance of 1 m between furrows for the period from 24 to 29 September 2015, we observed that during the first 24 h evaporation was 22.80 m³ ha⁻¹ in the RZ system, 15.10 in RSD and 30.30 in RGC.

As the evaporation loss gradually decreased until the last day observed, the evaporation between day 4 and 5 after irrigation was 3.75 m³ ha⁻¹ for RZ, 2.95 for RSD and 3.10 for RGC. In the period from

Cuadro 3. Pérdida por evaporación directa de suelo desnudo con tres sistemas de riego, posterior a un riego de 10 L m⁻¹ equivalente a 100 m³ ha⁻¹.

Table 3. Loss from direct evaporation of bare soil with three irrigation systems after an irrigation of 10 L m⁻¹ equivalent to 100 m³ ha⁻¹.

Sistema de Riego	Septiembre 2015				Enero 2016			
	24	72	120	Σ	24	72	120	Σ
RZ (Volumen en m ³ ha ⁻¹)	22.80	11.20	7.50	41.50	13.30	10.50	8.90	32.70
RSD (Volumen en m ³ ha ⁻¹)	15.10	8.00	5.90	29.00	8.00	6.00	5.00	19.00
RGC (Volumen en m ³ ha ⁻¹)	30.30	15.90	5.80	52.00	14.50	10.60	8.80	33.90

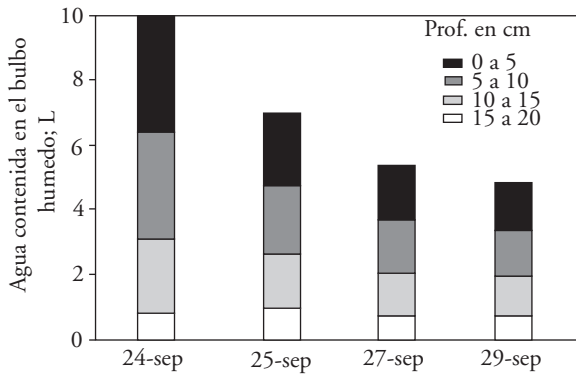
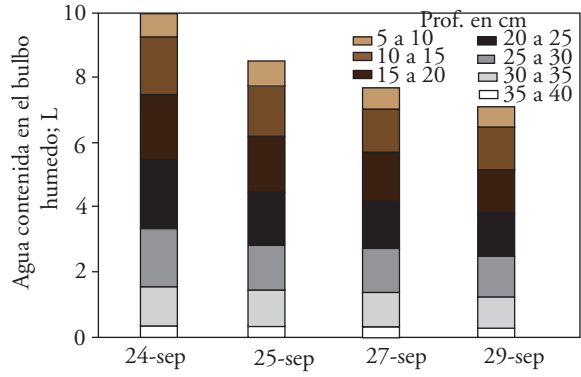
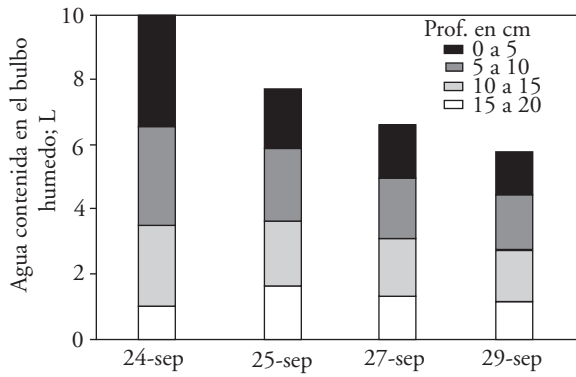


Figura 11. Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, septiembre de 2015. A: RZ; B: RSD; C: RGC.

Figure 11. Distribution of water contained in the soil by measuring depth levels in three irrigation systems, September 2015. A: RZ; B: RSD; C: RGC.

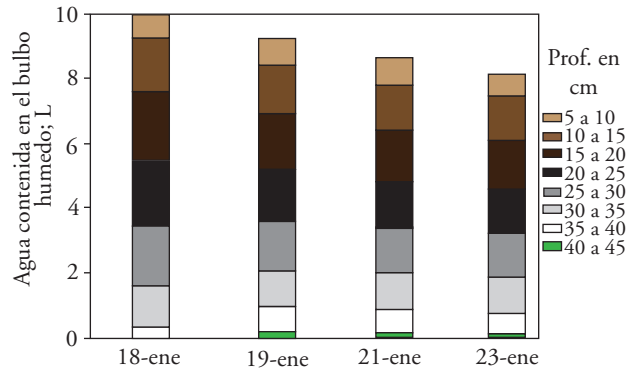
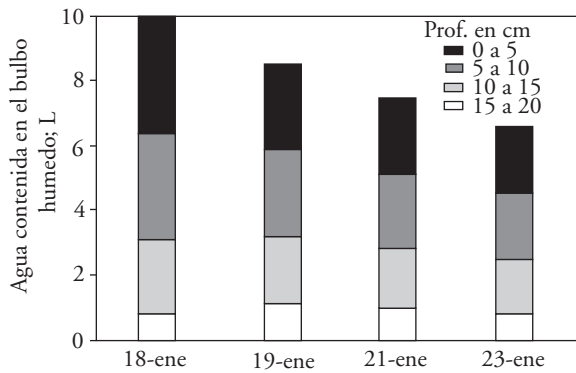


Figura 12. Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, enero de 2016. A: RZ; B: RSD; C: RGC.

Figure 12. Distribution of water contained in the soil by depth in three irrigation systems, January 2016. A: RZ; B: RSD; C: RGC.

en los sistemas superficiales, y de 10 a 30 cm de profundidad en el sistema subterráneo. Con la distribución del agua por capas se puede explicar la diferencia de evaporación entre los sistemas superficiales y el sistema de aporte subterráneo porque en el subterráneo el agua está menos expuesta a los elementos del clima y estaría forma más resguardada. La ubicación y tamaño del bulbo húmedo del RSD es mayor respecto a los sistemas superficiales, ya que el movimiento del agua en el suelo es radial, por lo cual el bulbo es de mayor volumen pero con menor contenido de humedad con la misma cantidad de agua, de tal forma que en el suelo se consigue un mejor equilibrio entre agua y oxígeno para el cultivo.

Análisis estadístico

La pérdida de humedad fue calculada por diferencia entre la primera y la última muestra de cada capa a partir de los datos originales. Los datos se agruparon por capas, formando cuatro grupos, y para el análisis estadístico se consideraron los datos de las tres repeticiones por cada tratamiento. Los datos de humedad del suelo fueron analizados por profundidad (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm), a los cuatro grupos de datos se aplicó la prueba de normalidad de Barlett y se encontró que corresponden a una población normal, por lo cual se aceptó la hipótesis nula (H_0) de similitud de varianzas para todos los grupos analizados. Después de dicha prueba, los datos fueron analizados con Excel y se calculó la suma de cuadrados totales y la suma de cuadrados de tratamientos. Con esa información se realizaron los ANDEVA de una sola vía con $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$ y después las medias se compararon con DMS ($p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$) (Cuadros 4 y 5).

Para el período de septiembre de 2015, de 0 a 5 cm las diferencias fueron altamente significativas ($p \leq 0.01$): el tratamiento con menor evaporación fue RSD y el de mayor evaporación fue RZ. De 5 a 10 cm las diferencias también fueron altamente significativas ($p \leq 0.01$): el tratamiento con menor evaporación fue RSD, mientras que RZ fue similar al RGC ($p > 0.05$). De 10 a 15 cm, los resultados fueron similares ($p > 0.05$). De 15 a 20 cm los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), donde RZ y RGC tuvieron menor evaporación, pero similares entre sí ($p > 0.05$), y el riego con mayor pérdida fue RSD ($p \leq 0.05$).

January 18 to 23, 2016, during the first 24 h after irrigation, evaporation was $13.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in RZ, 8.0 in RSD and 14.5 in SRG. Then the evaporation loss for the last day observed between day 4 and 5 after irrigation was $4.45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ for RZ, 2.50 for RSD and 4.40 for RGC, which is shown in Table 3.

In all cases evaporative loss was lower in RSD; the difference between RSD and RZ was 30 % in September 2015 and 41 % in January 2016. The difference between RSD and RGC was 44 %, and the result was similar in both periods of experimentation. These data are similar to those by Meshkat *et al.* (2000), who compared the RGC with an underground drip system that consisted of placing a tube in the soil, removing the core of soil and filling it with coarse sand, which allowed to place the water under the surface, and the evaporation difference between the surface and underground systems was 39.8 %. Montemayor *et al.* (2006) used forage maize to compare irrigation by surface and underground drip irrigation and found that underground irrigation allows to save 27.4 %. This result is lower than that found in our research and also that reported by Meshkat *et al.* (2000). This difference can be due to the fact that maize cultivation casts shade on the soil surface, which favors the reduction of direct evaporation of the soil, a more marked effect in the last stages of cultivation. Godoy *et al.* (2005) compared underground drip irrigation with 6 sides for each line of trees against gravity irrigation (flood) in walnut pecan, in Matamoros, Coahuila, and reported a 30.6 % saving of water volume compared to the underground system.

The distribution of water in the layered soil profile is shown in Figures 11 and 12 for each irrigation system during the period observed (120 h after irrigation). The highest amount of water in the soil was deposited in the first layers, from 0 to 10 cm, in the surface systems, and 10 to 30 cm deep in the underground system. The layered water distribution can explain the evaporation difference between the surface systems and the underground supply system because in the underground water is less exposed to the climate elements and more sheltered. The location and size of the wet bulb of the RSD is greater with respect to the surface systems, since the movement of the water in the soil is radial, reason why the bulb is of greater volume but with less content of humidity with the same amount of water, which makes the soil

Cuadro 4. Resumen de ANDEVA y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 24 al 29 de septiembre de 2015.
Table 4. Summary of ANDEVA and comparison of means of humidity loss; period from 24 to 29 September 2015.

Profundidad	ANDEVA		Comparación de medias (DMS)	
	Valor de Fc	Resultado	Resultado	Observaciones
0-5 cm	1074.72	**	abc	RSD fue el tratamiento con menor pérdida.
5-10 cm	28.20	**	abb	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RZ fueron estadísticamente similares.
10-15 cm	2.99	NS	aaa	RSD, RGC y RZ fueron estadísticamente similares.
15-20 cm	9.29	*	abb	RZ y RGC fueron estadísticamente similares, RSD reflejó la mayor pérdida.

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

Cuadro 5. Resumen de ANDEVA y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 18 al 23 de enero de 2016.
Table 5. Summary of ANDEVA and comparison of means of humidity loss; period from 18 to 23 January 2016.

Profundidad, cm	ANDEVA		Comparación de medias (DMS)	
	Fc	Resultado	Resultado	Observaciones
0-5	337.83	**	Aab	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RZ fueron estadísticamente similares.
5-10	19.63	**	Aab	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RZ fueron estadísticamente similares.
10-15	2.81	NS	Aaa	Los tres tratamientos fueron estadísticamente similares.
15-20	5.85	*	Abb	RZ y RGC fueron estadísticamente similares, RSD mostró la mayor pérdida.

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$.

Para enero de 2016, en la profundidad 0 a 5 cm los resultados muestran diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$): el tratamiento con menor evaporación fue RSD y RZ fue similar a RGC ($p > 0.05$). De 5 a 10 cm hubo diferencia significativa ($p \leq 0.01$), y el tratamiento con menor evaporación fue RSD, mientras que RZ fue estadísticamente similar a RGC. A su vez, de 10 a 15 cm los tres sistemas fueron similares ($p > 0.05$). En contraste, de 15 a 20 cm de profundidad hubo diferencias significativa ($p \leq 0.05$), y los sistemas con menor evaporación y estadísticamente similares fueron RZ y RGC, mientras que la mayor pérdida se observó en RSD.

Allen *et al.* (2006) estiman pérdidas por evaporación directa del suelo de 28.95 % del volumen total de agua para riego de cultivos perennes, de acuerdo con la distribución cuantitativa anual de la evapotranspiración según FAO (2007). A manera de ejemplo, al aplicar los resultados obtenidos en los tres

achieve a better balance between water and oxygen for cultivation.

Statistical analysis

The moisture loss was calculated by the difference between the first and last samples of each layer from the original data. The data were grouped by layers, forming four groups, and for the statistical analysis we considered the data of the three replicates for each treatment. Soil moisture data were analyzed by depth (0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm). We applied the Barlett's normality test to the four data groups and found they corresponded to a normal population, whereby the null hypothesis (H_0) of similarity of variance was accepted for all the groups analyzed. After this test, the data were analyzed with Excel and the sum of total squares and the sum of squares of treatments were calculated. With this information

sistemas de riego en un cultivo que requiere $7000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en un año, las pérdidas por evaporación del suelo estimadas serían 2026.5 m^3 . En este caso, al considerar una aportación de $7000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ calculada para un sistema RGC, con los sistemas RSD y RZ se requerirían 6106 y 6712 m^3 , con un ahorro de agua estimado de 44% para RSD y 14% para RZ, en relación a la fracción del agua que se pierde por evaporación directa del suelo.

Temperatura del suelo

Durante el experimento se midió la temperatura del suelo en los sistemas de riego a tres profundidades (5, 10 y 15 cm) y las temperaturas ambiente (máxima y mínima) para cada día a las 8:30 AM y 2:00 PM. Los valores de máxima y mínima ambiental fueron 36.1 y $24.9 \text{ }^\circ\text{C}$ en septiembre de 2015, las cuales bajaron a 26.2 y $10.4 \text{ }^\circ\text{C}$ en enero de 2016; en ambos períodos la temperatura máxima se presentó de 14:00 a 16:00 h (Figuras 13 y 14). La variación de la temperatura del suelo a diferentes profundidades reflejó una tendencia similar al contenido de humedad en las mismas. En septiembre de 2015, la mayor temperatura en la superficie del suelo ($57.7 \text{ }^\circ\text{C}$) se observó en RSD y la menor ($44.1 \text{ }^\circ\text{C}$) en RZ, lo cual es esperable por la humedad que aporta este sistema, y RGC mostró un valor intermedio ($51.9 \text{ }^\circ\text{C}$); a 5 cm de profundidad fue mayor en RGC ($47.4 \text{ }^\circ\text{C}$) que en RSD ($46.5 \text{ }^\circ\text{C}$) y RZ ($35.0 \text{ }^\circ\text{C}$). A 10 cm la diferencia de temperatura del suelo entre sistemas disminuyó notoriamente, y el máximo ($35.1 \text{ }^\circ\text{C}$) fue para RGC y el mínimo ($32.0 \text{ }^\circ\text{C}$) para RZ. De manera similar, a 15 cm RGC mostró la máxima ($32.6 \text{ }^\circ\text{C}$) y RZ la mínima ($29.3 \text{ }^\circ\text{C}$). En ambas profundidades de 10 y 15 cm, RSD mostró valores intermedios (33.9 y $32.2 \text{ }^\circ\text{C}$). En enero de 2016 RSD tuvo la máxima en superficie ($42.8 \text{ }^\circ\text{C}$) y a 5 cm ($34.9 \text{ }^\circ\text{C}$), donde RZ y RGC registraron temperaturas similares. A 10 y 15 cm las diferencias de temperatura del suelo entre los tres sistemas se redujo considerablemente: RSD y RZ con temperaturas similares, medias de 28.9 y $125.0 \text{ }^\circ\text{C}$, y RGC presentó mínimas de 25.9 y $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$.

La temperatura de suelo es importante como indicador del contenido de humedad en el suelo y de la cantidad de agua que el suelo entrega a la atmósfera. En un viñedo de 12 ha irrigado con riego por goteo superficial, Kerridge *et al.* (2013) compararon la temperatura de la superficie del suelo entre hileras (suelo

the single-track ANDEVA were performed with $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$ and means were compared with DMS ($p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$).

For the period September 2015, from 0 to 5 cm the differences were highly significant ($p \leq 0.01$): the treatment with less evaporation was RSD and the one with the highest evaporation was RZ. From 5 to 10 cm the differences were also highly significant ($p \leq 0.01$): the treatment with lower evaporation was RSD, while RZ was similar to RGC ($p > 0.05$). From 10 to 15 cm, the results were similar ($p > 0.05$). From 15 to 20 cm the results showed significant differences ($p \leq 0.05$), where RZ and RGC had less evaporation, but similar to each other ($p > 0.05$), and irrigation with greater loss was RSD ($p \leq 0.05$).

In January 2016, at 0 to 5 cm deep the results showed highly significant differences ($p \leq 0.01$): the treatment with lower evaporation was RSD, and RZ was similar to RGC ($p > 0.05$). From 5 to 10 cm there was a significant difference ($p \leq 0.01$), and the treatment with lower evaporation was RSD, while RZ was statistically similar to RGC. In turn, from 10 to 15 cm the three systems were similar ($p > 0.05$). In contrast, from 15 to 20 cm deep there were significant differences ($p \leq 0.05$), and the systems with lower evaporation and statistically similar were RZ and RGC, while the larger loss was observed in RSD.

Allen *et al.* (2006) estimated losses by direct soil evaporation of 28.95% of the total volume of water for perennial crop irrigation, according to the annual quantitative distribution of evapotranspiration, according to FAO (2007). As an example, when applying the results obtained in the three irrigation systems in a crop that requires $7,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in a year, the estimated soil evaporation losses would be 2026.5 m^3 . In this case, on considering a contribution of $7000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ calculated for an RGC system, the RSD and RZ systems would require 6106 and 6712 m^3 , with an estimated water saving of 44% for RSD and 14% for RZ in relation to the fraction of the water lost by direct evaporation of the soil.

Soil temperature

During the experiment, we measured soil temperature in irrigation systems at three depths (5, 10 and 15 cm) and ambient temperatures (maximum and minimum) for each day at 8:30 AM and 2:00

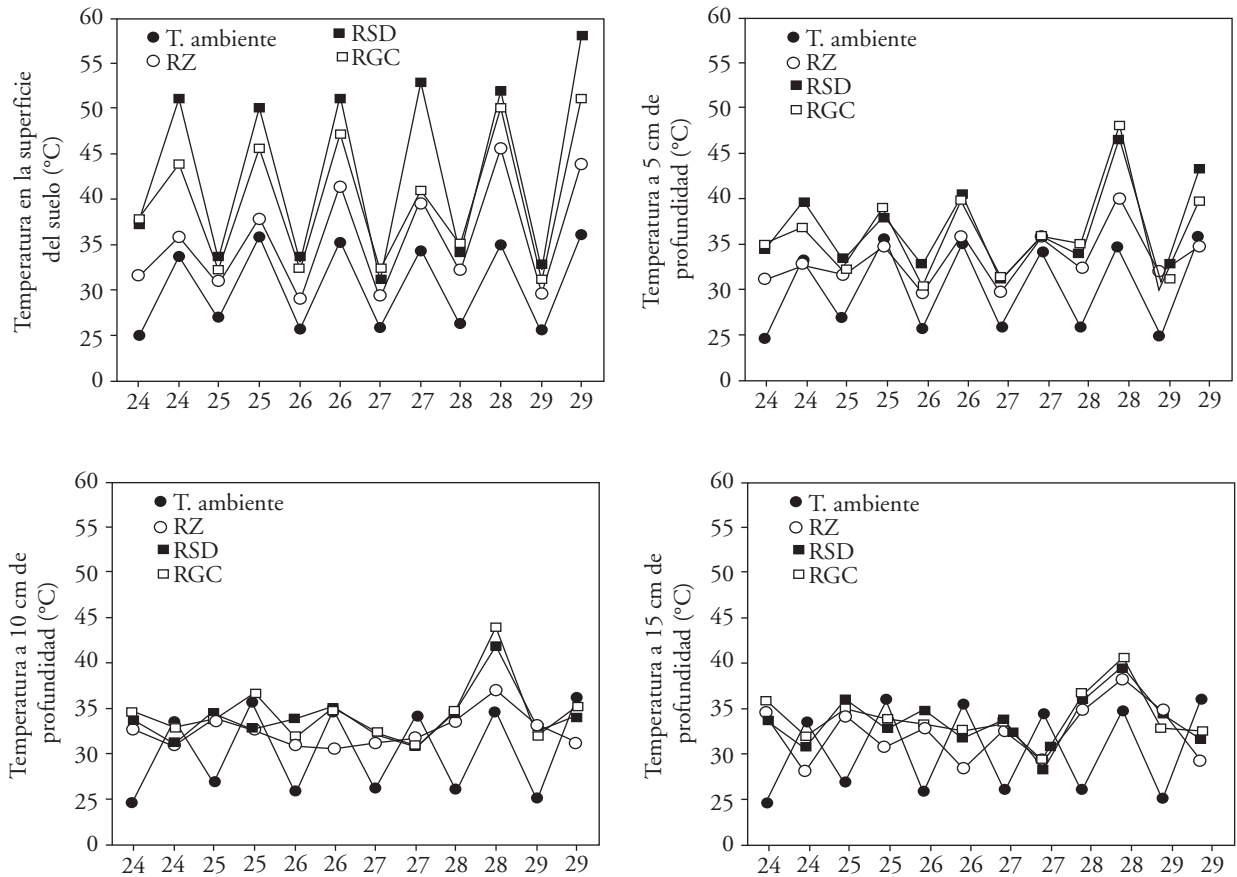


Figura 13. Tendencia de la temperatura del suelo en el período del 24 al 29 de septiembre de 2015.
 Figure 13. Trend of soil temperature in the period from 24 to 29 September 2015.

seco) y dentro de hileras de plantas (suelo húmedo) por medio de un método para estimar la evaporación del suelo. Dicho método se basa en una función lineal del cambio de temperatura de la superficie del suelo; concluyeron que la aplicación de la temperatura de la superficie del suelo es un método promisorio para estimar la evaporación directa del suelo, mediante el uso de sensores permanentes distribuidos en el viñedo para el registro sistemático de datos diarios.

CONCLUSIONES

Al comparar los tres sistemas de riego, la evaporación del riego subterráneo por difusores fue la de menor magnitud, y la diferencia es considerable en la pérdida de agua por evaporación de suelo desnudo entre el riego subterráneo y los sistemas superficiales. La mayor diferencia en temperatura fue en las profundidades de 0 a 10 cm en los sistemas superficiales

PM. The maximum and minimum environmental values were 36.1 and 24.9 °C in September 2015, which fell to 26.2 and 10.4 °C in January 2016; in both periods the maximum temperature was observed from 14:00 to 16:00 h (Figures 13 and 14). The variation of soil temperature at different depths reflected a trend similar to the moisture content in them. In September 2015, the highest soil surface temperature (57.7 °C) was observed in RSD and the lowest (44.1 °C) in RZ, which is expected because of the humidity provided by this system, and RGC showed an intermediate value (51.9 °C); at 5 cm deep temperature was higher in RGC (47.4 °C) than in RSD (46.5 °C) and RZ (35.0 °C). At 10 cm the soil temperature difference between systems decreased markedly, and the maximum (35.1 °C) was observed in RGC and the minimum (32.0 °C) in RZ. Similarly, at 15 cm RGC showed the maximum (32.6 °C) and RZ the minimum (29.3 °C). At both

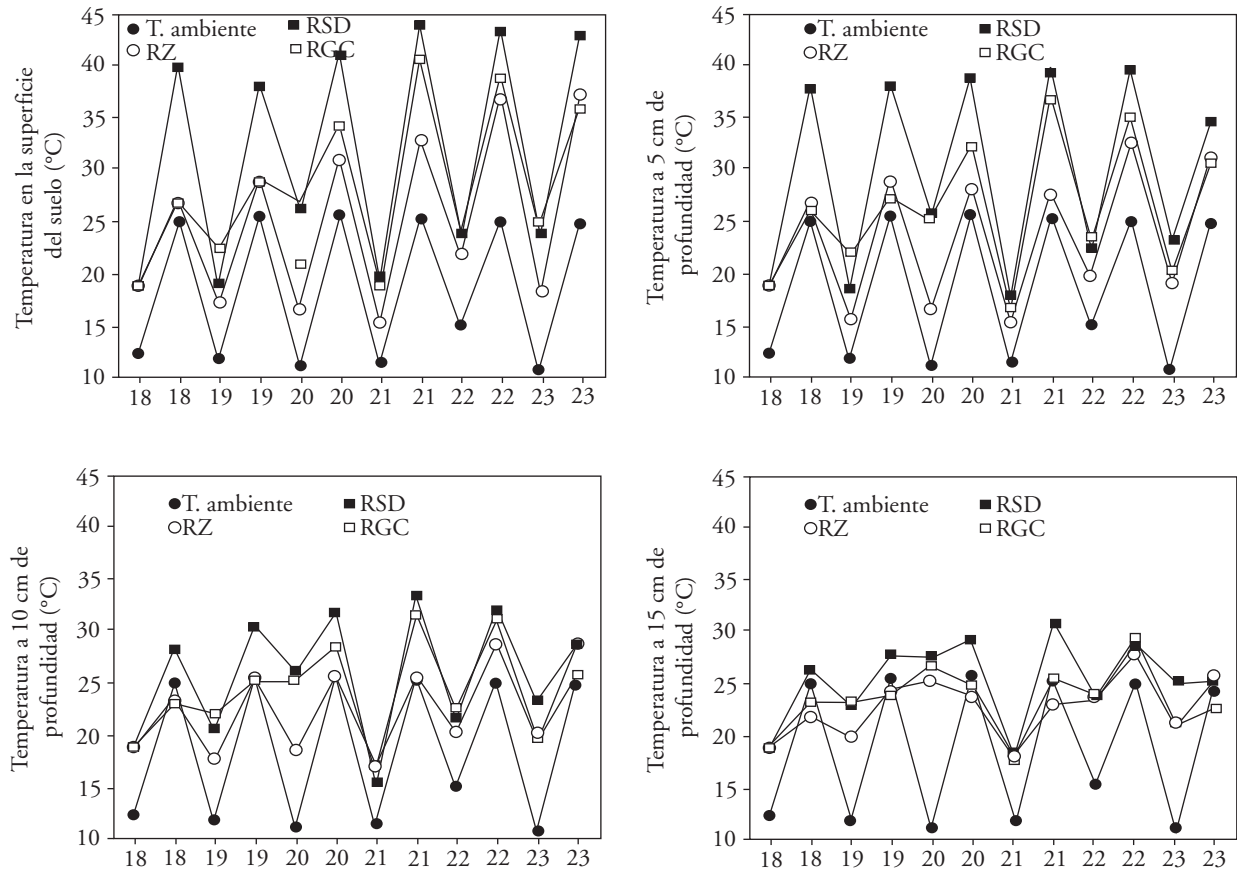


Figura 14. Tendencia de la temperatura del suelo en el período 18 al 23 de enero de 2016.

Figure 14. Trend of soil temperature in the period from 18 to 23 January 2016.

comparados con el riego subterráneo, lo cual confirma los resultados porque con una mayor evaporación hay mayor influencia en el cambio de temperatura. Nuestro estudio muestra una clara ventaja del riego subterráneo respecto a los riegos por goteo convencionales, para la conservación del agua en sistemas agrícolas de zonas áridas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT la beca de doctorado otorgada al primer autor, al Fondo CONAGUA-CONACYT el apoyo financiero mediante el proyecto 0249265 Convocatoria 2014; al personal del Laboratorio de Irrigación, Álvaro González, Juan E. Vega y Arturo Cruz; de Suelos, Manuel S. Trasviña; de Fisiotecnia Vegetal, Lidia Hiraes y Carmen Mercado; asimismo, a los técnicos del Campo Experimental Adrián Jordán, Raymundo Ceseña, Pedro Luna y Saúl Briseño, por su fructífera colaboración.

depths of 10 and 15 cm, RSD showed intermediate values (33.9 and 32.2 °C). In January 2016 RSD had the maximum in surface (42.8 °C) and at 5 cm deep (34.9 °C), where RZ and RGC recorded similar temperatures. At 10 and 15 cm the soil temperature differences between the three systems reduced considerably: RSD and RZ recorded similar temperatures, averages of 28.9 and 25.0 °C, and RGC had minimum temperatures of 25.9 and 22.4 °C.

Soil temperature is important as an indicator of the soil moisture content and the amount of water the soil gives to the atmosphere. In a 12-hectare vineyard irrigated with surface drip irrigation, Kerridge *et al.* (2013) compared the temperature of the soil surface between rows (dry soil) and within rows of plants (wet soil) by means of a method used for estimating soil evaporation. This method is based on a linear function of the temperature change of the

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 298 p.
- Ayars, J. E., C. J. Phene, R. B. Huttmacher, K. R. Davis, R. A. Schoneman, S. S. Vail, and R. M. Mead. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Manage.* 42: 1-27.
- Ayars, J. E., A. Fulton, and B. Taylor. 2015. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay?. *Agric. Water Manage.* 157: 39-47.
- Camp, C.R., J. T. Garrett, E. J. Sadler, and W. J. Busscher. 1993. Microirrigation management for double-cropped vegetables in a humid area. *Trans. ASAE* 36: 1639-1644.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección. 31 de diciembre de 2002. México, D.F.
- Dos Santos, L. N., E. E. Matsura, I. Z. Goncalves, E. A. A. Barbosa, A. A. Nazário, N. F. Tuta, M. C. L. Elaiuy, D. R. C. Feitosa, and A. C. M. de Sousa. 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agric. Water Manage.* 170: 91-98.
- FAO (Food And Agriculture Organization of The United Nations). 2007. Information System on Water and Agriculture - Aquastat. 263 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta edición. México, D.F. 91 pp.
- Godoy A., C., I. Reyes J., y C. A. Torres E. 2005. Riego por goteo subsuperficial en nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) con diferente número de laterales de riego. *Agric. Téc. Méx.* 31: 203-212.
- Hammer, Ø., D. A. T. Harper, and P. D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Kerridge, B. L., J. W. Hornbuckle, E. W. Christen E., and R. D. Faulkner. 2013. Using soilsurface temperature to assess soil evaporation in a drip irrigated vineyard. *Agric. Water Manage.* 116: 128-141.
- Lewis, D.W. 1984. *Practical Sedimentology*. Edit. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, USA. 217 p.
- Meshkat, M., R. C. Warner, and S. R. Workman. 2000. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation. *Trans. ASAE* 43: 79-86.
- Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. A. Hanjra, and J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agric. Water Manage.* 97: 528-535.
- Montemayor T., J. A., J. L. Lara M., J. L. Woo R., J. Munguía L., M. Rivera G., y R. Trucíos C. 2012. Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la

soil surface; they concluded that the application of soil surface temperature is a promising method to estimate the direct evaporation of the soil through the use of permanent sensors distributed in the vineyard for the systematic recording of daily data.

CONCLUSIONS

When comparing the three irrigation systems, the evaporation of the underground irrigation by diffusers was the smallest, and the difference is considerable in the loss of water by evaporation of bare soil between underground irrigation and surface systems. The greatest difference in temperature was in the depths of 0 to 10 cm in the surface systems compared to the underground irrigation, which confirms the results because with greater evaporation the change of temperature is bigger. Our study shows a clear advantage of underground irrigation over conventional drip irrigation for water conservation in arid zone agricultural systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank CONACYT for the doctoral scholarship awarded to the first author; CONAGUA-CONACYT Fund for the financial support through the project 0249265 in 2014; the staff of the Laboratory of Irrigation, Álvaro González, Juan E. Vega and Arturo Cruz; of Soils, Manuel S. Trasmuñoz, Lidia Hirales and Carmen Mercado; likewise technicians of the Experimental Field, Adrián Jordán, Raymundo Ceseña, Pedro Luna and Saúl Briseño, for their fruitful collaboration.

—End of the English version—



Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, México. *Agrociencia* 46: 267-278.

Montemayor T., J. A., A. O. Gómez M., J. Olague R., A. Zermeno G., E. Ruiz C., M. Fortis H., E. Salazar S. y R. Aldaco N. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Téc. Pecu. Méx.* 44: 359-364.

Ortiz V., B. y C. A. Ortiz. 1990. *Edafología*. Edit. Universidad Autónoma Chapingo. 7ª Edición. Texcoco, Estado de México. México. 394 p.

Safi, B., M. R. Neyshabouri, A. H. Nazemi, S. Massiha, and S. M. Mirlatifi. 2007. Water application uniformity of a sub-

- surface drip irrigation system at various operating pressures and tape lengths. *Turk. J. Agric. For.* 31 (2007): 275-285.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2016. Normales Climatológicas – Baja California Sur. Servicio Meteorológico Nacional. http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=162&tmpl=component. (Consulta: Noviembre 2016).
- Thompson, T. L., P. Huan-cheng, and L. I. Yu-yi. 2009. The Potential Contribution of Subsurface Drip Irrigation to Water-Saving Agriculture in the Western USA. *Agric. Sci. China* 8: 850-854.
- Walkley, A., and I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-37.
- Yarwood, A. 2005. Introduction to AutoCAD 2005: 2D and 3D Design. Ed. Elsevier. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP. UK. 321 p.
- Zhang, Q., S. Wang, L. Li., M. Inoue, J. Xiang, G. Qiu, and W. Jin. 2014. Effects of mulching and sub-surface irrigation on vine growth, berry sugar content and water use of grapevines. *Agric. Water Manage.* 143: 1–8.