

Caracterización hidrodinámica del modelo de Green y Ampt en un suelo con mejoradores orgánicos

Hydrodynamic characterization of the Green and Ampt model in a soil with organic improvers

Lugo-Valenzuela H², Prado-Hernández JV¹, Vázquez-Peña MA¹, Pineda-Pineda J¹, Velázquez-López N¹

¹ Departamento de Investigación y Posgrado en Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, Carretera Federal México- Texcoco Km 38.5, CP 56230, Texcoco, México.

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Carretera Internacional entronque a carretera La Brecha, Ejido Burrioncito, CP 81149, Sinaloa, México.

RESUMEN

En la agricultura la eficiencia del agua y el equilibrio de oferta y demanda en cultivos son primordial. La falta de conocimientos en proceso de infiltración en riego por gravedad, aumenta en cultivos de alta demanda como maíz, sorgo y frijol. Conocer la retención de humedad en suelos agrícolas es importante, para satisfacer la demanda en la agricultura. Esta investigación tuvo como objetivo estudiar el movimiento hidrodinámico del agua en ocho tratamientos, mezclados de manera homogénea, con aditivos orgánicos y suelo agrícola (franco arcilloso), analizando beneficios en riego por gravedad (Intervalo de riego). La infiltración (F), se analizó con el modelo de Green y Ampt; se evaluaron propiedades físicas directas e indirectas, como son el contenido volumétrico de agua a saturación (θ_s) y presión capilar frente de humedecimiento (ψ_f), curva de tensión de humedad, el segundo parámetro aplicando método de Brooks y Corey (1964), y conductividad hidráulica (Ks). Los resultados son variables relacionando al testigo, mejoradores orgánicos incrementaron un 30 % la retención de humedad y el intervalo de riego incrementó seis días. El incremento en retención de humedad e infiltración acumulada, se obtuvieron con material orgánico (T2) y material orgánico (T7), y obtenidos en residuos en cosecha de maíz.

Palabras clave: Enmienda orgánica; infiltración; retención de humedad; modelación matemática.

ABSTRACT

In agriculture, water efficiency as well as supply and demand balance in crops are essentials. The lack of knowledge in the infiltration process in gravity irrigation increases in high-demand crops such as corn, sorghum and beans. Knowing the moisture retention in agricultural soils is important to satisfy the demand in agriculture. The purpose of this research was to study the hydrodynamic movement of water in eight treatments, mixed homogeneously, with organic additives and agricultural soil (clay loam), analyzing benefits in gravity irrigation (irrigation interval). Infiltration (F) was analyzed with the Green and Ampt model; direct and indirect physical properties were evaluated, such as the volumetric water content at saturation (θ_s) and capillary pressure against wetting (ψ_f), humidity tension curve, the second

parameter applying the Brooks and Corey (1964) method, and hydraulic conductivity (Ks). The results are variable in relation to the control, organic improvers increased moisture retention by 30% and the irrigation interval increased by six days. The increase in moisture retention and accumulated infiltration, were obtained with organic material (T2) and organic material (T7), in corn harvest residues.

Keywords: Organic amendment, infiltration, moisture retention, mathematical modeling

INTRODUCCIÓN

En la agricultura es necesario hacer un uso eficiente del agua y proveer una solución al uso óptimo de este recurso para equilibrar la oferta y la demanda, ya que en regiones semiáridas y áridas existe una creciente competencia entre los limitados recursos hídricos y la creciente demanda por los cultivos (Li *et al.*, 2012). Para incrementar la eficiencia de aplicación en los métodos de riegos superficial es necesario entender el proceso de infiltración, que permite calcular el tiempo óptimo de riego (Barry *et al.*, 2005), conociendo la curva de retención de agua en el suelo, que se define como la relación entre el contenido volumétrico de agua y el potencial mátrico que determinan el flujo de agua en la zona no saturada (Moret y Latorre, 2016). Esta relación es fundamental para estudiar el drenaje, proceso de infiltración, conductividad hidráulica, programación de riegos y estrés hídrico en las plantas, además, es una variable esencial en los modelos hidrológicos y balances hídricos (Solon *et al.*, 2012). Existen materiales considerados como mejoradores del suelo que, por sus características físicas y químicas, ayudan a mejorar la retención de humedad, entre ellos están los hidrogeles y otros materiales orgánicos obtenidos por pirólisis de la biomasa residual de plantas, que promueven tanto la retención del agua como la de nutrientes (Opatokun, 2017). La infiltración es el componente del ciclo hidrológico que conecta el flujo superficial y el agua subterránea, esta propiedad del suelo es importante en el diseño de sistemas de riego y drenaje, transporte de sedimentos y solutos, manejo de cuencas (Ali *et al.*, 2016), estimación de escurrimiento hidrológico y recargas de acuíferos (Van den Putte *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2016). Se ha desarrollado un gran número de modelos para calcular la infiltración acumulada y la tasa de infiltración,

*Autor para correspondencia: Homero Lugo Valenzuela
 Correo electrónico: hlv_300@hotmail.com

Recibido: 17 de diciembre 2021

Aceptado: 6 de enero 2022

tales modelos se clasifican en empíricos como el propuesto por Kostiaikov (1932) y en semi-empíricos y físicos (Muñoz-Carpena y Gowdisha, 2005). El primero no es capaz de describir el proceso de infiltración a detalle, sin embargo, los modelos basados en principios físicos describen con mayor detalle dicho proceso; entre los modelos físicos se encuentra el modelo de Richard y el de Green y Ampt (Ali *et al.*, 2016; Deng y Zhu, 2016). La ecuación de infiltración de Green y Ampt es una de las más extensamente usadas en la simulación del proceso de infiltración (Ali *et al.*, 2016) y de erosión (Mao *et al.*, 2016), ya que aplica directamente la ley de Darcy. Además, debido a la simplicidad y precisión en su resolución, este modelo se utiliza para simular la infiltración vertical en una dimensión en el suelo (Green y Ampt, 1911), a diferencia del modelo complejo de Richard, que requiere una técnica numérica implícita iterativa discreta en el tiempo y en el espacio para su solución, que implica un alto costo computacional (Rao *et al.*, 2009). El modelo de Green y Ampt se aplica en suelos uniformes, estratificados, condiciones de precipitación estable o inestables y condiciones homogéneas en contenido de agua (Deng y Zhu, 2016; Rao *et al.*, 2009; Haibili y Heidarpour, 2015), ya que asume una conductividad hidráulica constante y un porcentaje en el contenido de agua en la zona de humedecimiento y una carga negativa constantes en el frente de mojado (Haibili y Heidarpour, 2015). Este conjunto de propiedades físicas del suelo, involucradas en su uso y manejo, son importantes para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas (Thompson y Troeh, 1988). Algunas modificaciones al modelo que se han propuesto se han combinado con los eventos de precipitación y han sido adoptadas en programas computacionales de modelación de cuencas como el SWAT (Neitsch *et al.*, 2002) y HEC-HMS (USACE, 2001). Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estudiar la retención de agua y la infiltración del agua en un suelo agrícola franco arcilloso con y sin mejoradores orgánicos en diferentes proporciones, para estimar el tiempo de riego por gravedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de drenaje y física de suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada a 19° 20' latitud norte, 98° 53' longitud oeste, 2240 m. Este consistió en la toma de 15 muestras de un kg de suelo en forma homogénea y estratificada a una profundidad de 30 cm, en un terreno ubicado en el distrito de riego número 35 "el Burrión" en Guasave, Sinaloa, México. Se determinaron los intervalos de riegos para cultivo de maíz para el ciclo agrícola otoño-invierno con la información climatológica del lugar más cercano al sitio experimental en Guasave, Sinaloa. La evapotranspiración se calculó aplicando el método de Blaney y Criddle (1950). Se obtuvieron los costos de producción de los tratamientos, que consistieron en mezclas en diferentes proporciones de suelo con los materiales orgánicos que se usaron como mejoradores de suelos. Los mejoradores orgánicos se obtuvieron a partir de los residuos de cosecha del cultivo de

maíz. Se aplicó material procesado mediante pirólisis y no procesado (material orgánico sin ninguna modificación), e hidrogel sintetizado a partir de pectinas del extracto del fruto de tejocote, mediante hidrólisis ácida (Heano, 2012). Se estableció un experimento con ocho tratamientos que se formaron con la adición de diferente dosis de mejorador, los cuales se establecieron en un diseño completamente aleatorizado (DCA) con tres repeticiones de cada uno. Se utilizaron 8 muestras de suelo con textura franco arcilloso, las cuales fueron procesadas a través del tamiz No. 10 para obtener partículas menores de 2 mm de diámetro. Estas muestras de suelo se mezclaron con diferentes proporciones de los materiales orgánicos evaluados como mejoradores de suelo. Los tratamientos evaluados fueron los siguientes: T1 = Suelo sin mejorador (testigo); T2 = Suelo + 20 g material procesado; T3 = Suelo + 20 g material sin procesar; T4 = Suelo + 20 g hidrogel; T5 = Suelo + 40 g material procesado; T6 = Suelo + 40 g material sin procesar; T7 = Suelo + 40 g hidrogel y T8 = Suelo + 20 g material procesado + 20 g material sin procesar + 20 g hidrogel.

Variables medidas y estimadas en laboratorio

Las variables que se midieron en laboratorio (propiedades físicas directas) para cada tratamiento fueron: la densidad aparente ρ_b (método de la parafina), conductividad hidráulica K_s (permeámetro de carga constante), porosidad total η , humedad inicial (método gravimétrico), densidad real ρ_a (método del picnómetro), saturación efectiva (S_e), textura (método de Day), humedad a capacidad de campo (CC), humedad en el punto de marchitez permanente (PMP) y se obtuvo la curva de retención de humedad mediante el método de la olla de presión; a partir de dicha curva se obtuvieron la humedad inicial, humedad a saturación (Θ_s), presión de entrada del aire (ψ_b) y presión capilar en el frente de humedecimiento (ψ_f), humedad residual (Θ_r) e índice de porosidad (β) (Prado *et al.*, 2017).

Modelo de infiltración de Green y Ampt

W. H. Green y G. A. Ampt (Jintao *et al.*, 2008) desarrollaron el primer modelo físico del proceso de infiltración. Este modelo describe ecuaciones simples para describir el cálculo de la infiltración. Green y Ampt lograron simplificar la teoría de la infiltración considerando el frente de humedecimiento. La Ecuación 1 de infiltración de Green y Ampt tiene tres parámetros que se necesitan estimar, estos son la conductividad hidráulica a saturación K_s ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), la carga de presión capilar en el frente de humedecimiento ψ_f (cm) y el contenido del cambio de humedad, el cual es la diferencia entre la porosidad y el contenido de agua inicial del suelo θ_i .

$$F(t) = K_s t + \lambda \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$\lambda = (p + \psi_f)(\Theta_s - \theta_i) \quad (2)$$

Donde $F(t)$ es la infiltración acumulada (cm), t es el tiempo (h), ψ_f es la carga de presión capilar en el frente de

humedecimiento (cm), p es la profundidad del agua sobre la superficie (cm), θ_i y θ_s son los contenidos volumétricos de agua en el suelo inicial y a saturación, respectivamente ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), y K_S es la conductividad hidráulica a saturación ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$). Corey y Brooks (2009) estudiaron las variaciones de la carga de succión ψ , con el contenido de humedad θ , en diferentes tipos de suelo y encontraron una relación gráfica y empírica entre la succión del suelo y la saturación efectiva S_e conocida como la ecuación de Brooks-Corey (1964) (Ecuación 3).

$$S_e = \left[\frac{\psi_b}{\psi} \right]^\beta \quad \text{para } \psi \geq \psi_b \quad (3)$$

Donde ψ es la presión capilar (cm), β es el índice de distribución de tamaño de poros ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), ψ_b es la presión de entrada del aire (cm).

La saturación efectiva se puede expresar como la relación entre la humedad disponible $\theta - \theta_r$ (condición inicial) y el máximo contenido de humedad en el suelo o porosidad efectiva ϕ_e (Ecuación 4) (Van Genuchten, 1980).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi_e} \quad (4)$$

Dónde: θ es el contenido de humedad ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) correspondiente a una presión capilar ψ , θ_r es el contenido de humedad residual drenado ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y ϕ_e es la porosidad efectiva $\eta - \theta_r$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), donde η es la porosidad total.

La presión capilar del frente de humedecimiento se obtuvo de la integración de la ecuación de Brooks y Corey (1964) de la conductividad hidráulica relativa a través de la (Ecuación 5) (Rawls *et al.*, 1982; Xiang *et al.*, 2015; Prado *et al.*, 2017).

$$\psi_f = \frac{2+3\beta}{1+3\beta} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \quad (5)$$

Dónde: ψ_b es la presión de entrada de aire (cm) y β tiene el mismo significado que en la Ecuación 3.

Los parámetros ψ_b y β se obtuvieron resolviendo las Ecuaciones (3) y (4), dos formas de calcular la saturación efectiva del suelo (S_e), empleando las curvas de retención de humedad del suelo (Brooks y Corey, 1964) propiedades físicas indirectas que se obtienen de gráficos.

Obtención de las curvas de tensión de humedad del suelo

Las curvas de tensión de humedad se obtuvieron de muestras de 20 g de suelo por tratamiento, con tres repeticiones, las cuales se colocaron en cilindros (5.1 cm de diámetro y 5 cm de altura) y se determinó el contenido de humedad mediante el método de la olla de presión (Wang *et al.*, 2013) a tensiones (ψ) de 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 16 y 17 atm. Se determinó el contenido de humedad (θ) de cada tratamiento para cada presión aplicada mediante el método gravimétrico, y con la densidad aparente del suelo se convirtió a humedad volumétrica. Se

graficaron los pares de puntos (θ , ψ) como lo describe Prado *et al.* (2017).

Calibración y ajuste estadístico del modelo de Green y Ampt.

Para encontrar el valor de los parámetros del modelo de Green y Ampt (ψ_b y β) se aplicó el método de mínimos cuadrados no lineales, el cual establece que: dado un vector de parámetros, encontrar el error mínimo entre los valores predichos por el modelo y los datos medidos en laboratorio, Ecuaciones 6 y 7.

$$\hat{p} = \arg \min J(p) \quad (6)$$

$$J(p) = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M (\bar{y}_h(t_i, p) - y_h(t_i))^2 \quad (7)$$

Donde $\bar{y}_h(t_i, p)$ son los valores estimados por el modelo en el tiempo t_i , $y_h(t_i)$ son los valores medidos y_h en el tiempo t_i , L es el número de salidas, M es el número de mediciones, p es el vector de parámetros en la calibración, \hat{p} es el vector de parámetros con errores minimizados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo (S_e de la Ecuación 3), a los valores medidos (S_e de la Ecuación 4) se calcularon: el coeficiente de correlación (r), el sesgo (BIAS) y la raíz del cuadrado medio de los errores (RMSE) con el uso de los programas R-Proyect (2.14.2) y R Development Core Team (2011) y análisis bibliográfico se utilizó el editor Mendeley Support Team, (2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas de tensión de humedad

En la Figura 1 se presenta la curva de tensión de humedad que caracterizó a cada uno de los tratamientos experimentales, en esta se aprecia la variabilidad en la capacidad de almacenamiento del agua de los ocho tratamientos, siendo el tratamiento testigo T1 (Suelo sin ningún mejorador) el que presentó los valores más bajos, con un contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) de $0.41 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ y un punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) de $0.135 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Los cuatro tratamientos con mayor capacidad de retención fueron: T2, T7, T6 y T5, cuyos valores de θ_{CC} y θ_{PMP} respectivamente, fueron (0.44 y $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), (0.44 y $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), (0.35 y $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y (0.41 y $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); mientras que los tratamientos T8 (0.38 y $0.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), T3 (0.37 y $0.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y T4 (0.39 y $0.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Se aprecia el incremento de humedad retenida por los tratamientos con materiales orgánicos, los cuales tienen una diferencia de hasta el $0.10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de agua retenida, donde los mejores tratamientos (T2 y T7) fueron con aditivos orgánicos. En el tratamiento T7 se encontró el mayor almacenamiento de agua fácilmente disponible (30%) para la planta.

En la Tabla 1 se presentan, el coeficiente de correlación (r), el sesgo (BIA) y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE); se observa que en todos los tratamientos el sesgo fue menores a 0.014 correspondiendo el valor más bajo para el tratamiento 8; en general los valores de r fueron cercanos a

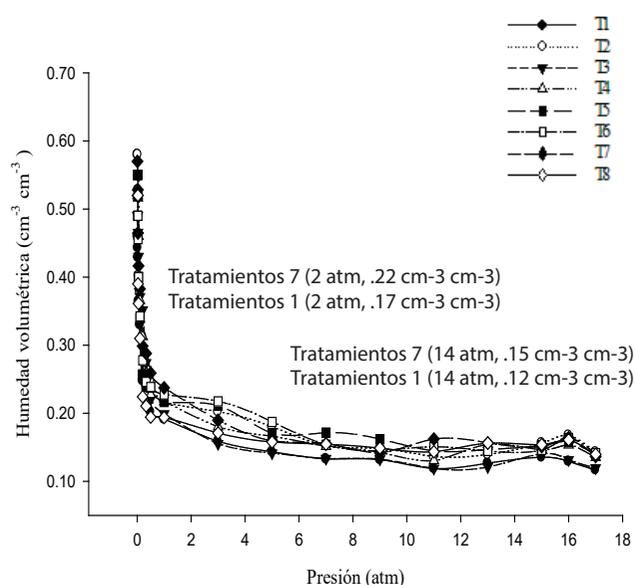


Figura 1. Curvas de retención de humedad de suelos tratados con mejoradores orgánicos.

Figure 1. Moisture retention curves of soils treated with organic improvers

la unidad, lo que indica un excelente ajuste de los datos; el valor más pequeño de RMSE se obtuvo en el tratamiento 4, esto indica la precisión del método. De acuerdo a los ajustes encontrados, se deduce que las estimaciones de la saturación efectiva y las medidas mediante el método volumétrico son similares (Tabla 2). De acuerdo a las investigaciones realizadas por Prado *et al.* (2017), los valores de ψ_f son confiables para utilizarlos en el modelo de Green y Ampt. Las variables estimadas y medidas son confiables para determinar la infiltración acumulada en suelos, pero no son confiables para todo tipo de suelo (Green y Ampt, 1911).

Tabla 1. Ajustes estadísticos de las curvas de saturación efectiva del suelo tratado con mejoradores orgánicos.

Table 1. Statistical adjustments of the effective saturation curves of soil treated with organic improvers.

Criterio	Tratamientos							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
R	0.93	0.98	0.95	0.98	0.97	0.89	0.89	0.96
Sesgo	0.02	0.01	0.01	0.09	0.09	0.01	0.05	0.01
RMSE	0.05	0.04	0.07	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06

En el Tabla 2 se muestran características físicas que resultaron de la estimación del modelo de Green y Ampt. Para resolver problemas de flujo en suelo no saturado a menudo se requiere el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo, la distribución del tamaño de partícula, densidad aparente y contenido de materia orgánica (Van Genuchten y Leij, 1980). Binayak (1999), menciona que las propiedades hidráulicas del suelo son importantes para la predicción del

flujo de agua en suelos con macro porosidad alta (Textura gruesa).

La conductividad hidráulica (K_s) fue la propiedad que más se modificó debido al cambio de porosidad, a mayor porosidad mayor conductividad hidráulica (Tabla 2), esto se debe al efecto positivo de la mayor cantidad de materia orgánica en los tratamientos, lo que implicaría un menor tiempo de riegos en cultivos agrícolas, por el incremento en la capacidad de retención debido a que la adición de mejoradores orgánicos, modifican las propiedades físicas en los suelos; se observó que los tratamientos con materia orgánica procesado (T2) y sin procesar (T6), mostraron mejores características; mientras que la aplicación del gel (T8) y tratamiento testigo (T1) no mostraron mejorías en dichas propiedades. El riego con agua subterránea altamente salada, la liberación de agua de mar en las zonas costeras y la acumulación de sales en regiones áridas son las principales causas de la salinidad de los suelos sin materia orgánica (Clarenc *et al.*, 2020).

Tabla 2. Parámetros físicos e hidrodinámicos del suelo tratado con diferentes mejoradores orgánicos.

Table 2. Physical and hydrodynamic parameters of the soil treated with different organic improvers.

Parámetros físicos obtenidos en forma directa									
	Símbolo	Tratamientos							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Densidad aparente (g cm ⁻³)	ρ_b	1.2	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1
Densidad real (g cm ⁻³)	ρ_s	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.7	2.5
Porosidad total (cm)	H	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6
Conductividad hidráulica (mm h ⁻¹)	K_s	4.8	7.9	5.6	6.1	7.9	8.5	7.4	5.9
Humedad a capacidad de campo (cm ³ cm ⁻³)	θ_{cc}	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
Humedad a punto de marchitez permanente (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PMP}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Parámetros físicos obtenidos en forma indirecta									
Presión de entrada de aire (cm)	ψ_b	17	13	15	14	17	13	12	17
Índice distribución de poros (cm ³ cm ⁻³)	B	0.5	0.7	0.5	0.8	0.6	0.3	0.7	0.5
Presión capilar en el frente de humedecimiento (cm)	ψ_f	32	31	31	35	34	21	29	33
Humedad de saturación (cm ³ cm ⁻³)	θ_s	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
Humedad residual (cm ³ cm ⁻³)	θ_r	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Curvas de infiltración acumulada

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la lámina infiltrada acumulada del modelo de Green y Ampt de los 8 tratamientos, los cuales parten de una humedad inicial del 0.15 cm³·cm⁻³. Para un tiempo de oportunidad de una hora se observa claramente una mayor lámina de agua infiltrada en el suelo con mejoradores orgánicos que en el

testigo, maximizándose en el suelo con 40 g hidrogel (T7), con los que se podría tener mayor uniformidad del patrón de láminas infiltradas en el riego por gravedad. Se han evaluado modelos como el de Richard para determinar la infiltración acumulada (Raó, 2006). Sin embargo, este modelo es difícil de implementar por la cantidad de parámetros involucrados; por otro lado, es más factible la aplicación del modelo de Green y Ampt, para el manejo del riego en suelos agrícolas y predice de manera aceptable la tasa de infiltración (Prado *et al.*, 2017). Machiwal *et al.*, (2006) menciona que es posible que la alta variabilidad de los parámetros de los modelos de infiltración, no permitan encontrar un patrón definido de valores, como fue reportado por Machiwal *et al.*, (2006). De acuerdo con esta investigación, los mejoradores orgánicos obtenidos de biomasa seca, ricos en polímeros naturales, procesados por pirólisis pueden ser utilizados para retener humedad en suelos agrícolas, resultados que concuerdan con los encontrados por Xiang *et al.* (2015)

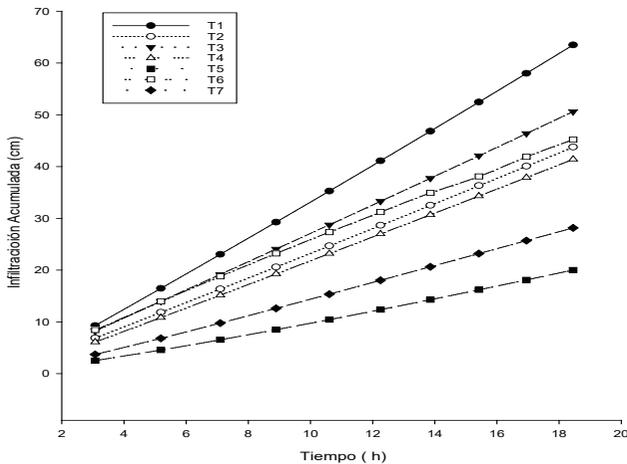


Figura 2. Infiltración acumulada (F) en suelo tratado con diferentes mejoradores orgánicos.

Figure 2. Accumulated infiltration (F) in soil treated with different organic improvers.

Cantidad y frecuencia de riegos requeridos

En la Figura 3 se muestra la cantidad de riegos que se deben aplicar en un suelo franco arcilloso con diferentes mezclas de materiales orgánicos como mejoradores de suelos. Se observa que existe una diferencia marcada en los intervalos de riegos para todos los tratamientos evaluados; los tratamientos T1, T2, T4, T5, T6 y T8 requieren mayor cantidad de riegos, pero T3 y T7 requieren un riego menos, de acuerdo al calendario de riegos que se aplica de manera normal que el agricultor aplica en el periodo de siembra (5 riegos), los riegos evaluados de acuerdo a datos calculados serían para T1=5, T2=5, T3=4, T4=5, T5=6, T6=6, T7=4 y T8=7 como se muestra en la figura 3, donde el mejor aditivo es el T3 y T7 por lo que fueron los mejores tratamientos donde se utiliza menos agua, estudios realizados en laboratorio de física de suelos en la Universidad Autónoma de Chapingo. Esto indica un beneficio para los módulos de riego al reducir la cantidad

de agua utilizada en un sistema de riego por gravedad sin que la planta sufra algún daño por estrés hídrico.

Con estos resultados existe evidencia suficiente para justificar la adición de materiales orgánicos, ya que se podrían aumentar los intervalos en el tiempo de riego y disminuir la cantidad de agua utilizada por los cultivos, lo que propiciaría un ahorro sustancial del vital líquido utilizado por los cultivos.

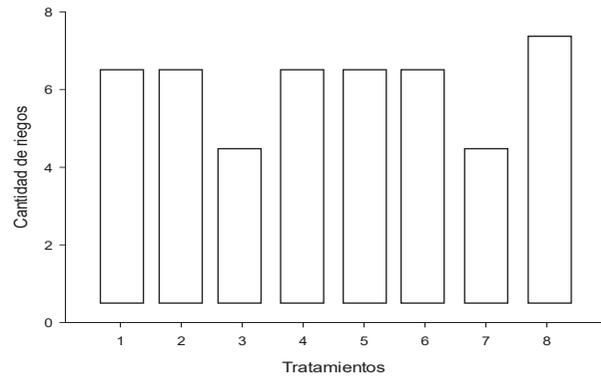


Figura 3. Número de riegos en suelo tratado con diferentes mejoradores orgánicos en riego por gravedad.

Figure 3. Number of irrigations in soil treated with different organic improvers with gravity irrigation.

Estudio de viabilidad de acuerdo a costos de producción de los mejoradores orgánicos.

Se realizaron las proyecciones de los costos de producción de los mejoradores orgánicos de suelo, para una tonelada de producción, en donde se obtuvieron los siguientes resultados en pesos (\$): T1 (0), T2 (200), T3 (300.3), T4 (18,208), T5 (452.3), T6 (17,304), T7 (18,404), T8 (18,798). El mejorador orgánico más rentable de acuerdo a su retención de humedad es el material procesado con pirólisis. En forma general, sustratos orgánicos elaborados con la glucosa ha sido la mayor fuente de carbono utilizada en los procesos fermentativos, obteniéndose altos rendimientos de biomasa y productividad de lípidos en comparación con otras fuentes de carbono (Silva-Rodríguez *et al.*, 2021). Los hidrogeles son materiales de un costo alto de producción, según estudios realizados por Mehmet (2014). Los altos costos (\$) de algunos materiales orgánicos mejoradores de suelos son razones suficientes por las cuales no se aplican a suelos agrícolas, además de que pueden causar daños a los suelos de acuerdo a los materiales sintéticos utilizados (hidrogel) (Hernández, 2012). Una de las ventajas de los materiales procesados con pirólisis, a partir de residuos de maíz, es que ayudan a mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos y son de bajo costo, ya que son elaborados de materiales prácticamente de desecho. En el Estado de Sinaloa el residuo de maíz es un material que existe en abundancia por las grandes superficies agrícolas destinados a la siembra de este cultivo (CONAGUA, 2020).

CONCLUSIONES

El modelo de Green y Ampt como herramienta para describir el proceso de infiltración mostró alto grado de confiabilidad en suelos con adición de mejoradores orgánicos, con la ventaja de ser un modelo basado en principios físicos y fáciles de implementar por su estructura matemática simplificada. Las adiciones de diferentes mejoradores orgánicos aumentaron en un 30% la retención de humedad, en un 5% la conductividad hidráulica (K_s) y en 7% la porosidad total (η), parámetros del modelo de Green y Ampt que resultó adecuado para predecir la velocidad de infiltración del agua en el suelo. La adición de mejoradores orgánicos de suelo incrementó el intervalo y disminuyó el número de riegos en suelos de textura franco arcilloso en Guasave, Sinaloa.

La aplicación al suelo de mejorador orgánico procesado podría ser una alternativa viable para el sector agrícola por su alto grado de retención de humedad, su bajo costo de producción y por su disponibilidad, en Guasave Sinaloa, México.

REFERENCIAS

- Ali, S., Islam, A., Mishra, P. K. y Sitka, A. K. 2016. Green and Ampt approximations: A comprehensive analysis. *Journal of Hydrology*. 535: 340-355.
- Barry, D. A., Parlance, J. Y., Li, L., Jing, D. S. y Crapper, M. 2005. Green and Ampt approximations. *Advances in Water Resources*. 28(10): 1003-1009.
- Binayak, P.M. 1999. Scaling hydraulic properties of a macroporous soil. *Water Resources Research*. 35(6): 1927-1931.
- Blaney, H.F. y Criddle, W.D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. 48va ed. Soil Conservation Service. Washington, D.C, U. S. A.
- Brooks, R. H. y Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. En: *Hydrology and Water Resources Program*. Royal Harvard (ed.). pp. 27. Colorado State University.
- Clarenc, A. R., Castellanos-Hernández, O. A., Rodríguez-Sahagún, A. y Acevedo-Hernández, G. J. 2020. Effect of saline stress on the morphology and phytochemistry of in vitro grown Mexican oregano (*Lippia grave lens* Knuth). *Biotecnia*. 22(3): 131-137.
- CONAGUA (Comisión Nacional Del Agua), 2020. Estadísticas agrícolas de hidrométrica producción en México. <http://www.edistritos.com/DR/estadisticaAgricola/cultivo.php>.
- Corey, A.T. y Brooks R. H. 2009. The Brooks-Corey relationships. In Van Genuchten MT, Leij FJ, Wu L (Eds.) *Proc. Int. Workshop on characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. Riverside. 1: 13-18.
- Deng, P. y Zhu, J. 2016. Analysis of effective Green and Ampt hydraulic parameters for vertically layered soils. *Journal of Hydrology*. 538: 705-712.
- Green, W.H., y Ampt, G. 1911. Study in soil physics. I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science*. 4:1-24.
- Habili, M. J., y Heidarpour, M. 2015. Application of the Green and Ampt model for infiltration into layered soils. *Journal of Hydrology*. 527: 824-832.
- Heano, E. C. 2012. Extracción y caracterización de pectinas de cáscara de plátanos, Tesis Doctoral. Universidad de Colombia.

- Hernández, M. V. 2012. Caracterización de aditivos carbonáceos para extracción de fluoruros del agua con materiales orgánicos aplicando pirolisis. *Journal of Hydrology*. 2: 23-25.
- Jintao, L., Jiabao, Z. y Jie, F. 2008. Green and Ampt model for layered soils with non-uniform initial water content under unsteady infiltration. *Soil Science Society of America Journal*. 72(4): 1041-1047.
- Kostiakov, A. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *International Society of Soil Science*. 6: 17-21.
- Li, Y., Kinzelbach, W. y Zhou, J., C. 2012. Modelling irrigated maize with a combination of coupled-model simulation and uncertainty analysis, in the northwest of China. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15: 1465-1480.
- Machiwal, D., Jha, M.K. y Mal, B.C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of kharagpur, India. *Biosystems Engineering*. 95: 569-82.
- Mao, L., Li Y., Hao W., Zhou X. y Xu C. L. T. 2016. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green and Ampt model. *Soil and Tillage Research*. 161: 31-37.
- Mendeley Support Team. Getting Started with Mendeley [Internet]. Mendeley Desktop. 11: 1-16. [8 Jun 2011] Disponible en: <http://www.mendeley.com>
- Mehmet, Kucukmehmetoglu, A. G. 2014. The significance and impacts of large investments over the determination of irrigated agricultural land use: The case of the Euphrates and Tigris river basin. *Land Use Policy*. 53: 514-52.
- Moret, F. y Latorre. 2016. Estimate of the soil water retention curve from the sorptivity and parameter calculated from an upward infiltration experiment. *Journal of Hydrology*. 22: 95-98.
- Muñoz-Carpena, R. y Gowdsh, L. 2005. Aplicación del método de infiltración de Green and Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos. VII Jornada de investigación en zonas no saturada del suelo. 205-213.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. y King, K.W. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Texas Water Resources Institute. 191: 123-234.
- Opatokun, S. A. 2017. Agronomic assessment of pyrolysed food waste digestate for sandy. *Journal of Environmental Management*. 187: 24-30.
- Prado Hernández, J. V., Pascual Ramírez, F., Cristóbal Acevedo, D., Carrillo García, M., Hernández Saucedo, F. R. y Martínez Ruíz, A. 2017. Evaluation of Green and Ampt infiltration equation in some agricultural soils in México, using USDA information and a modified method from Brooks and Corey. *Interciencia*. 42(9): 563-569.
- Core Team, R. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing. Vienna. Austria. Available online at <https://www.R-project.org/>.
- Rao, M.D., Raghuvanshi, N.S. y Singh, R. 2009. Development of a physically based 1D- infiltration model for seal formed irrigated soils. *Agricultural Water Mananagent*. 85: 165-174.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., y Saxton, K. E. 1982. Estimation of soil water properties. *Transaction of the ASAE*: 1316-1328.
- Silva-Rodríguez, D., Beltrán-Guilarte, Y., Ángulo-Mercado, E. R. y Quilodrán-Tolosa, B. H. 2021. Comparative study of the production of biomass and omega 3 and 6 in *Thraustochytrium kinneyi*. *Biotecnia*. 23(2): 73-80.

- Solone, R., Battelle, M., Tommie, F., y Morari, F. 2012. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. *Journal of Hydrology*. 470-471: 65-74.
- Thompson, L. M., y Troeh, F. R. 1988. *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverte.
- USACE-H. US Army Corps of Engineers, H. E. C. 2001. *Hydrologic modeling system HECHMS User's Manual*. USACE-HEC. Davis.
- Van den Putte, A., Govers, G., Leys, A., Langhans, C., Clymans, W. y Diels, J. 2013. Estimating the parameters of the Green and Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *Journal of Hydrology*. 476: 332-344.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44 (5): 892-898.
- Van Genuchten, M. Th. Leij, F. J. y Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental research laboratory, U.S. environmental protection agency.
- Wang, H., Xiao, B., Wang, M. y Shao, M. 2013. Modeling the soil water retention curves of soil-gravel mixtures with regression method on the loess plateau of China. *PLOS ONE*. e59475. 10.1371/journal.pone.0059475.
- Xiang, L., Ling W., Zhu Y., Chen L. y Yu Z. 2015. Self-adaptive Green and Ampt infiltration parameters obtained from measures moisture process. *Water Science and Engineering*. 9(3): 256-264.
- Yin, H. B. y Patel, J. 2018. Comparison of methods to determine the microbial quality of alternative irrigation waters. *Agricultural Water Management*. 201: 38-45.