

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Modelación del cambio de propiedades físicas sobre el funcionamiento hídrico de un suelo Ferralítico

Modeling of the change of physical properties on the water performance of a Ferralitic soil

Dr.C. Teresa López-Seijas, Ing. Elvis Santiesteban, Dr.C. Felicita González-Robaina, Dr.C. Yoima Chaterlan-Durruthy, Dr.C. Greco Cid-Lazo, Dr.C. Julián Herrera-Puebla

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba.

RESUMEN. El objetivo general de este trabajo es modelar el efecto del cambio de propiedades físicas e hidráulicas en un suelo arcilloso sobre su funcionamiento hídrico y la disponibilidad del agua para las plantas, utilizando una herramienta de simulación ya validada para estas condiciones. Los datos de referencia de suelo y clima se generaron en estudios antecedentes en la Estación Experimental del Instituto de Ingeniería Agrícola (IAgric), situada en Alquizar, provincia Artemisa, donde el suelo está clasificado como Ferralítico Rojo compactado y la caracterización climática utilizada es del periodo 1985–2010. Se utilizó el modelo MACRO que constituye un modelo mecanístico del transporte de agua y solutos en los suelos y que fue validado en estudio precedente para estas condiciones edafoclimáticas. Se utilizó la opción del modelo para la estimación de propiedades hidráulicas del suelo a partir de ecuaciones de pedotransferencia para estimar las variaciones a partir de modificaciones de la densidad volumétrica o aparente del suelo en las capas superficiales (0-40 cm). Los resultados mostraron que el rango de disminución hasta $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ de la densidad volumétrica o aparente en las capas superficiales estudiadas puede favorecer un incremento de la capacidad de retención del agua de hasta un 15% y puede esperarse en estas condiciones una posible disminución de las necesidades de riego entre 30-20% para el periodo seco y entre 90-35% en el periodo húmedo así como incrementos en la capacidad de infiltración del suelo de cerca del 30% con un proceso de redistribución de la humedad más lento.

Palabras clave: simulación transferencias hídricas, densidad aparente, capacidad de retención, infiltración.

ABSTRACT. The main objective of this work is to model the effect of the change of the physical properties and hydric behavior in a clay soil and the available water for plants using a simulation tool validated for these conditions. The soil and climate reference data were generated in previous studies in the Experimental Station of the Institute of Agricultural Engineering (IAgric), located in Alquizar, in Artemisa province, where soil is classified as Red Ferralitic and the climatic characterization used was from 1985 to 2010. It was used the MACRO model that constitute a mechanistic model of water and solute transport previously validated for this soil and climatic conditions. It was used the model option for estimate hydraulic properties of the soil using pedotransfer functions to estimate variations in these properties starting from variations in bulk density in upper soil layers (0-40 cm). The results show the decrease of bulk density in $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ in studied soil layers may produce an increase in water retention capacity until 15% and can produce a decrease in water needs between 30 to 20% for dry period and between 90 to 35% in wet period, increasing soil infiltration capacity about 30% with a more slow redistribution process.

Keywords: hydric transfer's simulation, bulk density, retention capacity, infiltration.

INTRODUCCIÓN

La utilización de modelos matemáticos para la simulación y predicción del movimiento del agua en los sistemas agrícolas, ha resultado una herramienta útil e indispensable para desarrollar soluciones de diferentes problemas de manejo agrícola y medioambiental. No obstante, la precisión de

sus resultados puede estar afectada en gran medida por la simplificación que se asume en las representaciones de los balances de agua en el suelo dentro de los modelos (Barrales *et al.*, 2004, Kumar y Singh, 2003, Singh y Datta, 2006, Candelaria *et al.*, 2011).

Los trabajos desarrollados en Cuba han calibrado y puesto a punto diferentes modelos de simulación de transferencias hídricas, fundamentalmente para las condiciones edafoclimáticas de la región del sur de La Habana (López *et al.*, 2001, 2009; Ruiz *et al.*, 2006; Rodríguez y López, 2000).

Entre los modelos trabajados se encuentra el modelo MACRO (Stenemo y Jarvis, 2003) que fue calibrado y validado para la predicción del proceso de redistribución del contenido de agua en un suelo Ferralítico Rojo compactado característico de toda la zona sur de las provincias Artemisa y Mayabeque. Los resultados de estos trabajos antecedentes demostraron que el modelo MACRO resultó ser más sensible a las variables que intervienen en la caracterización hidrodinámica del perfil del suelo (Rodríguez y López, 2000), las cuales pueden variar para un mismo tipo de suelo en dependencia de modificaciones estructurales que se presenten, dadas por manejos de riego o por tecnologías de preparación de suelos intensivas (Ruiz *et al.*, 2006, Cid *et al.*, 2011, Friedrich, 2017).

Partiendo de estos resultados antecedentes el presente trabajo se trazó como objetivo general: *modelar el efecto del cambio de propiedades físicas e hidráulicas en un suelo Ferralítico Rojo compactado sobre su funcionamiento hídrico y la disponibilidad del agua para las plantas, a partir de la utilización de una herramienta de simulación ya validada para estas condiciones.*

MÉTODOS

Caracterización edafoclimática de la zona de estudio

Los datos de referencia para este estudio de modelación se generaron en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), situada en Alquizar, provincia Artemisa, con las coordenadas: Latitud 22° 46' 50" N y Longitud 82° 36' 5" O, a una altura sobre el nivel medio del mar de 6 m y a 12 km de la costa.

Suelo. El suelo en estudio es Ferralítico Rojo Compactado de acuerdo a la Clasificación de Suelo vigente en el país y equivalente a la clasificación de Orthic Ferrasols según FAO/ UNESCO, según Cid *et al.* (2011). Este suelo es característico de toda la llanura cársica Habana-Matanzas, muy plana, con una altura inferior a 30 metros del nivel del mar y donde la agricultura es la actividad económica fundamental, siendo las viandas, hortalizas y granos los principales cultivos. Este suelo ha sido ampliamente estudiado y caracterizado en cuanto a sus propiedades físicas y químicas por Cid *et al.*, (2011) y López (2002)¹. Según estos autores el suelo presenta un comportamiento diferenciado de su funcionamiento hídrico en la capa de 0-30 cm con respecto a los valores de densidad aparente, el proceso de retención de humedad y de la conductividad hidráulica. A partir de los 40 cm hay una capa más compactada que diferencia estos procesos hidrodinámicos.

Clima. Los resultados de la caracterización climática en el periodo 1985–2010 realizada por Chaterlán *et al.* (2010), evidenciaron que esta zona está fuertemente caracterizada por el régimen de distribución de las precipitaciones dentro del año. El valor de la media anual de las precipitaciones alcanza los 1531 mm, de los

cuales el 68% (1044,4 mm) corresponden al período lluvioso que se extiende desde el mes de mayo hasta el mes de octubre y el restante 32% (486,4 mm) se distribuyen entre los meses de noviembre y abril, correspondientes al período seco. El promedio anual de la evapotranspiración de referencia, ETo, es de 1365,3 mm y los máximos y mínimos corresponden a los meses de mayo (146,4 mm) y diciembre (78,8 mm) respectivamente. El balance de precipitación y ETo es negativo en el periodo seco, por lo que el riego es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas.

Resumen del basamento teórico del modelo MACRO (versión 5.0, Stenemo y Jarvis, 2003)

Modelo mecanístico del transporte de agua y solutos en los suelos, especialmente en suelos con predominio de la macroporosidad. El modelo puede ser corrido en uno o dos dominios (micro y macro porosidad): **Dos dominios:** macro y micro poros operan por separado, con regiones de interacción, cada una caracterizada por el grado de saturación, K y q; **Un solo dominio** (“suelos rígidos”): solución de ec.de Richards para flujo de agua no estacionario y las ecuaciones de convección-dispersión.

El modelo realiza un balance completo de agua: *tratamiento de la precipitación, la evapotranspiración (Et), extracción del agua por las raíces, percolación profunda y flujos horizontales hacia drenes.* Para este trabajo solo se utiliza el balance de agua en suelo sin cultivo.

Información de entrada requerida por el modelo MACRO

Formato de los ficheros de entrada. Los ficheros de entrada se prepararon en formato ASCII con extensión.txt, cada columna representó una variable de entrada y se convirtieron en formatos.bin, en el modelo MACRO, usando la herramienta de conversión de ficheros Wizard.

Fichero de datos climáticos. Se requieren dos ficheros de datos climáticos para correr una simulación en Macro 5.0, uno para la precipitación y otro para el resto de las variables climáticas. Para este trabajo se crearon **cuatro ficheros de datos climáticos:** dos ficheros con valores de precipitación diaria de un año medio seco (probabilidad del 75%) y de un año medio húmedo (probabilidad del 25%) y dos ficheros con datos diarios de evapotranspiración de referencia (ETo).

Definición de la simulación con el modelo MACRO

Los componentes diferentes de una simulación pueden ser definidos en cualquier orden, pero en este trabajo se siguió el orden del menú.

Definición de las propiedades del suelo

En esta ventana se definió la información general del sitio y el perfil de suelo que se está simulando y se definieron las propiedades básicas de cada horizonte en el perfil del suelo.

¹ LÓPEZ, T.: Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los Balances Hídricos. Tesis Doctorado. INIFAT, Boyeros, La Habana, Cuba, 2002.

Cada horizonte está caracterizado por una denominación por capas para las cuales se identifica lo siguiente: % de arcilla, % de limo y % de arena, el pH, la densidad aparente o volumétrica ($g.cm^{-3}$), el contenido de carbón orgánico (%), la profundidad de cada capa, el tipo de textura predominante (arcillosa, limosa o arenosa), el tipo de estructura (fina, media y gruesa), la compactación (débil, moderada y fuerte) y la forma de la estructura (granular, plástico, bloque y prismática)

Para este trabajo se definieron 60 capas numéricas y 5 capas u horizontes del perfil del suelo (20, 40, 60, 80 y 100 cm) y a cada una de estas se le asignaron 12 capas numéricas. Las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil del suelo que se utilizaron para la simulación de referencia se resumen en la Tabla 1 y se tomaron de lo reportado por Rodríguez y López (2000) complementado con datos de Cid *et al.*, (2011).

TABLA 1. Valores de las propiedades físicas de referencia para el suelo Ferralítico Rojo compactado definidas para la simulación con el modelo MACRO

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	Densidad Aparente	Contenido de Carbón Orgánico%	Profundidad capa (cm)	Textura	Estructura	Compactación	Forma de la Estructura
0-20	59,2	22,3	18,5	7	1,18	2	20	arcillosa	media	moderada	bloque
20-40	64,1	13,8	22,1	7	1,21	1	20	arcillosa	media	fuerte	bloque
40-60	64,1	13,8	22,1	7	1,21	0,2	20	arcillosa	media	fuerte	plástico
60-80	64,1	13,8	22,1	7	1,21	0,2	20	arcillosa	media	fuerte	plástico
80-100	51,8	23,5	24,7	7	1,26	0,2	20	arcillosa	media	fuerte	plástico

Definición de las opciones de simulación

En la ventana “Options” se hicieron las elecciones básicas que definieron el tipo de simulación que se trabajó. Estas opciones fueron: condiciones iniciales y de frontera - gradiente hidráulico constante; manejo del sitio- no riego y no hay sistema de drenaje instalado; suelo desnudo sin cultivo; solo flujo de agua.

Definición de parámetros requeridos por el modelo para la simulación

En la ventana “Parameters” se definieron todos los valores de los parámetros requeridos por el modelo para la simulación que se agrupan a su vez en ventanas que corresponden a cada uno de los aspectos definidos en “Options”.

Los parámetros de las propiedades hidráulicas del suelo, curva tensión humedad y conductividad hidráulica utilizados para la simulación de referencia se tomaron de lo reportado por Rodríguez y López (2000).

Las curvas características o tensión humedad fueron ajustadas al **modelo de van Genuchten** (1980, modificado según Stenemo y Jarvis (2003):

$$S = \frac{\theta_{mi} - \theta_r}{\theta_s^* - \theta_r} = \left(1 + (a_{vg} \psi)^n \right)^{-m_{vg}}$$

donde:

S - contenido de agua efectivo;

θ_{mi} - contenido de agua en el suelo en la microporosidad;

θ_r - contenido de agua residual;

θ_s - falso contenido de agua saturación correspondiente al contenido de agua frontera que divide las zonas de acción predominante de la micro porosidad de la macro porosidad (todos los contenidos de agua en $cm^3.cm^{-3}$), h - tensión del agua en el suelo (cm);

α , n - parámetros de ajuste del modelo; $m = 1-1/n$.

Las curvas de conductividad hidráulica se ajustaron al modelo de Mualem (1976), modificado según Stenemo y Jarvis (2003) para la zona de la micro porosidad por la expresión:

$$K_{mi} = K_b \left(\frac{S}{S_{mi(\theta_b)}} \right)^n \left[\frac{\left(1 - \left(1 - S^{1/m_{vg}} \right)^{m_{vg}} \right)}{\left(1 - \left(1 - S_{mi(\theta_b)}^{1/m_{vg}} \right)^{m_{vg}} \right)} \right]$$

donde:

K_b - conductividad hidráulica frontera (correspondiente a θ_b);

$S_{mi(\theta_b)}$ - contenido relativo de agua según la expresión (1) considerando $\theta_{mi} = \theta_b$.

La conductividad hidráulica en los macroporos se determina por una expresión potencial simple según Stenemo y Jarvis (2003):

$$K_{ma} = K_{s(ma)} S_{ma}^*$$

donde:

n - exponente cinemático que refleja la distribución del tamaño de los macroporos y la tortuosidad y

$S_{ma} = \theta_{ma} / e_{ma}$, donde e_{ma} es la macroporosidad determinada como $\theta_s - \theta_b$.

Los parámetros utilizados para la corrida de referencia del modelo se resumen en la Tabla 2.

Las propiedades hidrodinámicas del suelo pueden ser también estimadas en el modelo MACRO desde las propiedades básicas del suelo que se definieron en el punto inicial, utilizando la ventana ‘Pedotransfer’ que tiene asociada una base de datos de funciones de pedotransferencia para esta estimación tomadas de diferentes autores (Wosten *et al.*, 1998; Jarvis *et al.*, 1997, 2002; Hollis y Woods, 1989, citados según referencia de Stenemo y Jarvis (2003).

Para este trabajo se utilizó esta opción para estimar variaciones en los parámetros de las propiedades hidráulicas a partir de modificaciones de propiedades físicas simulando variaciones estructurales de las capas superficiales del perfil del suelo. En la Tabla 3 se resumen los valores modificados de las propiedades físicas y los valores obtenidos por pedotransferencia de los parámetros de las propiedades hidráulicas para cada condición simulada.

TABLA 2. Valores de los parámetros de las propiedades hidráulicas del suelo Ferralítico Rojo compactado definidas para la simulación de referencia con el modelo MACRO

Profundidad (cm)	TPORV	XMPOR	RESID	GAMMA	CTEN	N	KSATMIN	KSM	ALPHA
20	59	39,8	23,2	1,18	12	1,083	300	1,000*E-01	0,397
40	56	41,4	25,1	1,21	12	1,092	300	1,000*E-02	1,031
60	56	41,4	25,1	1,21	12	1,102	300	1,000*E-03	0,608
80	56	41,4	25,1	1,21	12	1,092	300	1,000*E-04	0,917
100	55	42,5	16,3	1,26	12	1,084	300	1,000*E-05	0,442

Nota: **TPORV**: Contenido de agua saturada; **XMPOR**: Contenido de agua frontera; **RESID**: Contenido de agua residual; **GAMMA**: Densidad volumétrica; **CTEN**: tensión correspondiente al contenido de agua frontera; **N** y **ALPHA**: Coeficiente de ajuste de las curvas de van Genuchten's; **KSATMIN**: Conductividad hidráulica de saturación y **KSM**: Conductividad hidráulica frontera

TABLA 3. Valores de los parámetros de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo Ferralítico Rojo compactado modificados para cada condición estructural simulada con el modelo MACRO

Denominación de la Condición de Simulación	Prof. (cm)	da (g cm ⁻³)	Parámetros propiedades hidráulicas		
			α	n	m
Simulación con <i>da</i> de referencia	20	1,18	0,397	1,083	0,077
	40	1,21	1,031	1,092	0,084
	60	1,21	0,608	1,102	0,092
	80	1,21	0,917	1,092	0,084
	100	1,26	0,442	1,084	0,077
Simulación con <i>da</i> - 0,05	20	1,13	0,018	1,127	0,113
	40	1,16	0,010	1,100	0,091
	60	1,21	0,608	1,102	0,092
	80	1,21	0,917	1,092	0,084
	100	1,26	0,442	1,084	0,077
Simulación con <i>da</i> - 0,1	20	1,08	0,011	1,137	0,120
	40	1,11	0,009	1,108	0,097
	60	1,21	0,608	1,102	0,092
	80	1,21	0,917	1,092	0,084
	100	1,26	0,442	1,084	0,077

Definición de variables de salida de la simulación

En la ventana “Outputs” se seleccionaron las variables de salida que incluyen: contenido de agua, tensión del agua en el suelo, flujo y otros elementos del balance hídrico.

Conformación de la simulación

En la ventana “Simulation set-up” se fijaron los **tiempos de inicio y final de la simulación: comienzo 1/01 y fin 31/12 en todas las corridas diarias y cada 60 min en las corridas horarias**. El cálculo de las variables de salidas: *valor actual al final de cada intervalo de salida*.

Comparación de las diferentes condiciones estructurales simuladas y análisis estadístico involucrado

Las comparaciones involucraron la variable de salida Wv (contenido de agua volumétrico de 0-40 cm diario) para las tres condiciones

estructurales simuladas. Los estadígrafos utilizados fueron: *media, valor máx. y min., varianza, desviación absoluta, prueba T de Student* con un nivel de significación $p < 0,05$. La significación de esta prueba indica valores no idénticos de los contenidos de agua comparados (Wv con *da* de referencia con Wv con variaciones de *da*).

Para las comparaciones se utilizaron además diferentes límites del agua disponible en el suelo para las plantas que se calcularon a partir de dos criterios:

- el por ciento que representa la humedad al límite productivo (W_{Lp}) del valor máximo de retención o capacidad de campo (W_{Cc}), considerando $85\%W_{Cc}$, $90\% W_{Cc}$ y $95\% W_{Cc}$.
- fracción de agostamiento permisible, p, considerando $p=0,5$; $p=0,3$ y $p=0,1$ definida según Allen *et. al.* (2006):

$$p = AFA / ADT$$

donde:

AFA- agua fácilmente aprovechable, $AFA = 1000 \cdot (W_{Cc} - W_{Lp}) \cdot Zr$ (humedades en $cm^3 \cdot cm^{-3}$ y profundidad radical Zr en m);

ADT- agua total disponible en el suelo, $ADT = 1000 (W_{Cc} - W_{PMP}) \cdot Z_r$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de las propiedades hidráulicas del suelo modeladas

En las Figuras 1 y 2 se presentan las propiedades hidráulicas del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado, *curvas características o tensión - humedad y curvas de conductividad hidráulica no saturada*, modeladas para las diferentes condiciones estructurales simuladas a partir de la variación de la densidad volumétrica o aparente del suelo en las capas superficiales.

Como se puede apreciar en la Figura 1, hay un desplazamiento hacia la derecha de las curvas tensión-humedad en las capas superficiales, lo que va a implicar que para un mismo valor de tensión se tengan mayores contenidos de agua retenidos cuando disminuye la densidad aparente.

Si se analiza la variación del comportamiento de las curvas características en las diferentes condiciones estructurales que se simulan, se puede apreciar que hay algunas diferencias entre la profundidad de 20 cm y la de 40 cm, donde para esta última el desplazamiento de la curva a la derecha es mayor para

la primera disminución de la densidad aparente y a partir de aquí la variación se hace menor. Esto puede estar asociado a las propiedades texturales y estructurales propias de esta capa en este tipo de suelos, donde ocurre de manera natural una tendencia a la compactación. Esto ha sido señalado por otros autores como Cid *et al.*, (2011).

En la Figura 1 la línea discontinua roja indica el valor de tensión considerado para el límite máximo del agua disponible en el suelo para las plantas, correspondiente a la humedad a capacidad de campo, C_c , y la línea discontinua verde representa el valor de tensión considerado como el límite mínimo del agua disponible en el suelo para las plantas, correspondiente a la humedad al límite productivo, L_p , considerado como el 85% de C_c . Los valores de tensión para estos límites se tomaron de los definidos anteriormente en la calibración del modelo por Rodríguez y López (2000).

Si se analiza la variación del contenido de agua disponible para las plantas (diferencia entre estos dos límites) para las condiciones estructurales simuladas, se puede apreciar que se tiene un primer incremento promedio para la capa de 0-40 cm de cerca del 10% de este contenido de agua con la disminución en $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ de la densidad aparente y un aumento de hasta un 15% para una disminución de la densidad de $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

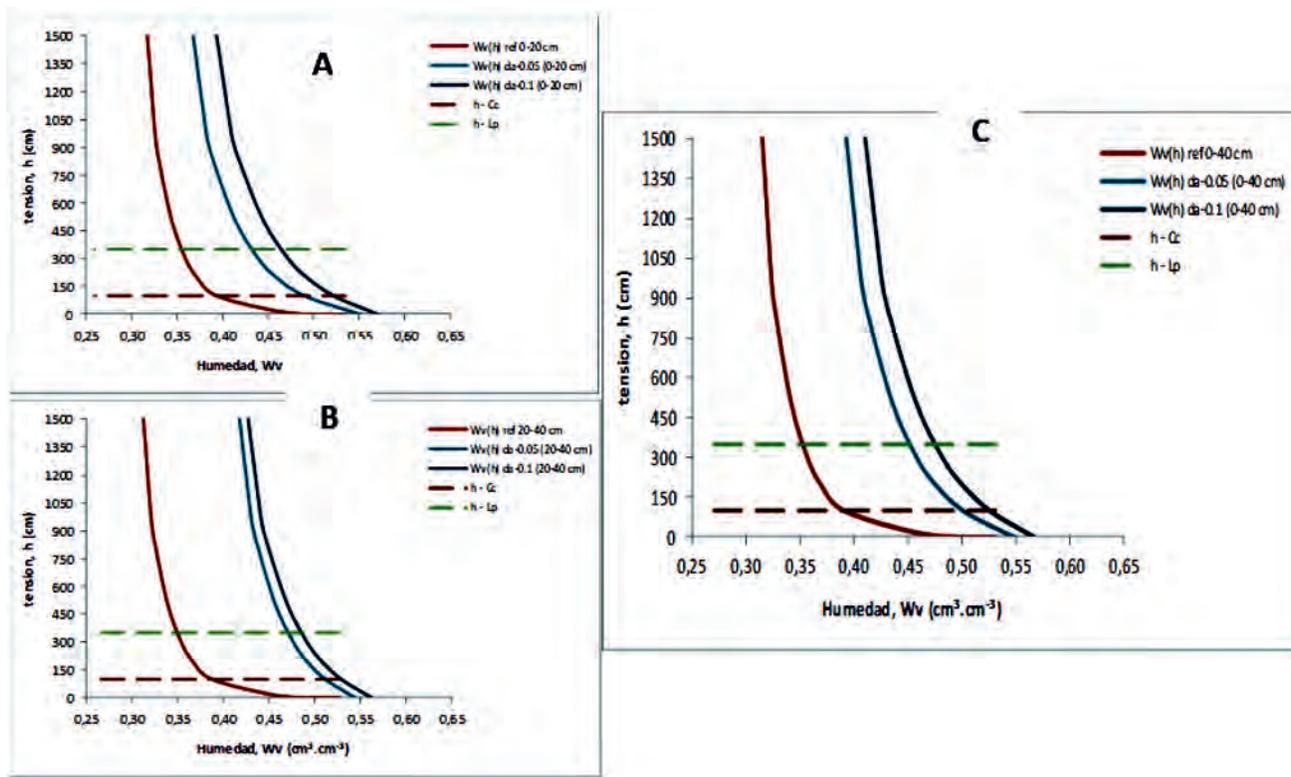


FIGURA 1. Curvas características o tensión – humedad del suelo Ferralítico rojo compactado modeladas para diferentes valores de la densidad aparente en las capas superficiales: A: 0-20 cm; B: 20-40 cm y C – promedio 0-40 cm.

Por otra parte en la Figura 2 se presentan las curvas de conductividad hidráulica en función de la humedad volumétrica obtenidas a partir de los parámetros de ajuste de las curvas tensión humedad al modelo van Genuchten - Mualem para los

diferentes valores de densidad aparente simulados.

Como se puede apreciar también ocurre un desplazamiento hacia la derecha de las curvas de conductividad hidráulica no saturada para las dos condiciones estructurales simuladas a

partir de la disminución de la densidad aparente, lo que indica un decrecimiento más brusco de la conductividad con la disminución de la humedad desde la saturación, asociado al incremento de la micro porosidad y la capacidad de retención del agua en estas capas, según lo ya analizado en las curvas de retención.

En esta figura la línea discontinua negra marca el valor de conductividad hidráulica no saturada de 1 mm-día⁻¹, que es considerado como el valor de conductividad límite o frontera a partir del cual el proceso de redistribución es más lento y puede considerarse "despreciable" en comparación con la máxima retención

de humedad que se tiene y puede ser utilizado como criterio para definir el límite superior del agua disponible para las plantas.

Como se puede apreciar las variaciones de la densidad aparente simuladas provocan un aumento del contenido de agua al que ocurre este límite entre 10%-15% con la disminución entre 0,05 g·cm⁻³ - 0,1 g·cm⁻³ de la densidad aparente, similar a lo observado en el análisis de las curvas características. Este comportamiento indica que con las variaciones de la densidad se puede esperar una mayor capacidad de infiltración y retención del agua en estas capas del perfil del suelo.

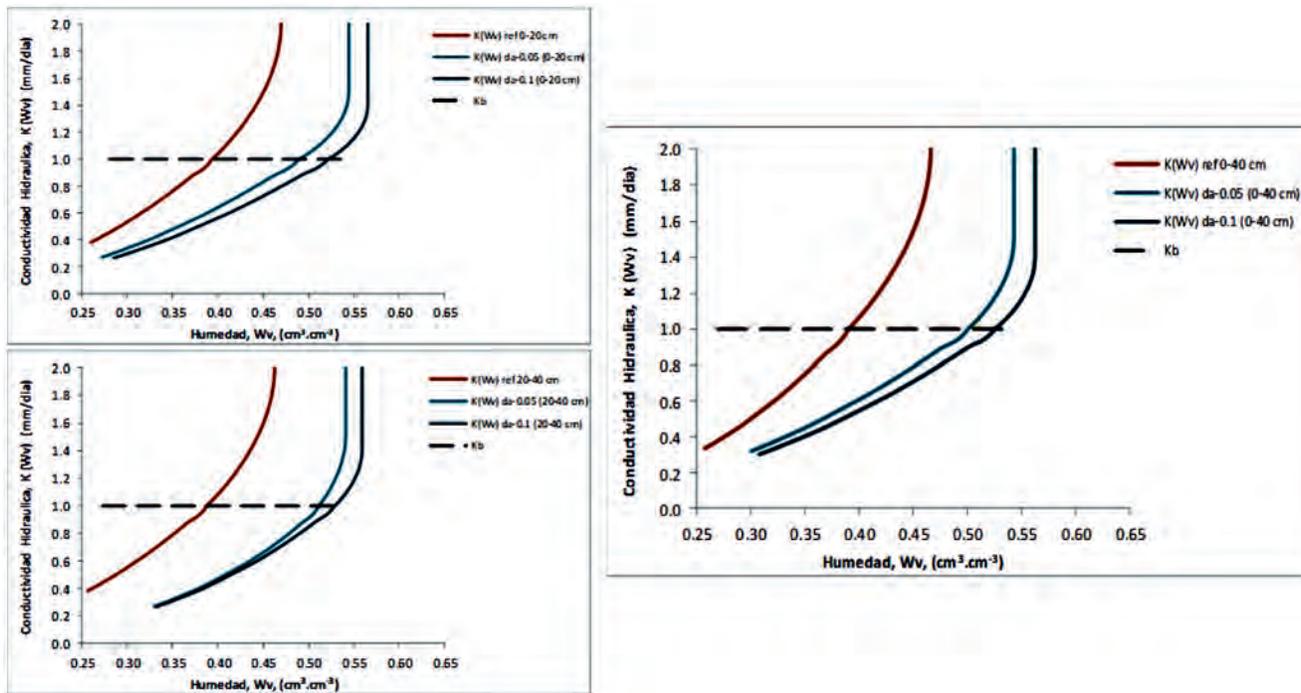


FIGURA 2. Curvas de conductividad hidráulica no saturada del suelo Ferralítico rojo compactado modeladas para diferentes valores de densidad aparente en las capas superficiales: A: 0-20 cm; B: 20-40 cm y C - promedio 0-40 cm.

Otros autores como Cid *et al.* (2011), Ruiz *et al.* (2006) y López *et al.* (2009) han planteado la incidencia de la variación de las propiedades físicas básicas (texturales y estructurales) del suelo en el comportamiento de sus propiedades hidráulicas y por tanto en su funcionamiento hídrico. En particular para el suelo Ferralítico analizado estos autores han demostrado la marcada diferencia que se produce en el movimiento del agua en la capa de 20-40 cm, debido fundamentalmente a la compactación producida por la acción antrópica que reduce el espacio poroso y por tanto la capacidad de infiltración y almacenamiento del agua para una mayor disponibilidad del agua para las plantas.

Comportamiento del balance hídrico del perfil del suelo modelado

Las variaciones entre los elementos del balance hídrico modelados para diferentes condiciones de densidad aparente en el periodo de un año son pocos significativos o poco apreciables visualmente. Comparando el año seco con el húmedo se pudo observar que existen variaciones en cuanto a la precipitación y la variación del almacenamiento del agua en el suelo, de este

último se tienen menores valores negativos en el año húmedo, lo que indica una menor extracción de la reserva hídrica del suelo por el aporte de las lluvias.

No obstante, cuando se analizan los valores totales de cada uno de los elementos del balance hídrico (Tabla 4) y se realiza una valoración diferenciada de la lámina almacenada en la capa de 0-40 cm con respecto a todo el perfil, se puede evidenciar un incremento del agua almacenada entre 5 mm – 11 mm, pasando a ser cerca del 40% del agua almacenada en el perfil. La percolación no presenta grandes variaciones en relación a los valores totales, aunque disminuye a medida que cambia la densidad aparente.

En la Figura 3 se ilustra solamente la variación de la humedad durante todo el año dentro de la capa de suelo de 0-40 cm, para los cambios de la densidad aparente modelados. Como se puede observar, aunque tienen una misma tendencia, puede visualizarse un incremento de la humedad con la disminución de la densidad para el año seco, obteniéndose los mayores incrementos, entre 2% y 4% del contenido de agua volumétrico, en el periodo de julio-diciembre. Para la condición de año húmedo

los valores de humedad son en general más altos y los incrementos del contenido de agua con la disminución de la densidad son mayores durante todo el periodo.

TABLA 4. Valores totales de los elementos del balance hídrico modelados en el suelo Ferralítico rojo compactado para diferentes valores de densidad aparente y para dos condiciones climáticas (año seco y año húmedo)

Condición de simulación	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Lámina Almacenada (mm)			Percolación (mm)		
			0-100 cm	0-40 cm	%	0-100 cm	0-40 cm	%
AÑO SECO								
<i>da</i> ref.	1134	624	53	15	28	658	49	7
<i>da</i> -0,05	1134	639	59	20	34	639	46	7
<i>da</i> -0,1	1134	655	67	26	39	617	40	6
AÑO HUMEDO								
<i>da</i> ref.	1335	702	93	38	41	619	71	11
<i>da</i> -0,05	1335	702	99	45	45	579	68	12
<i>da</i> -0,1	1335	702	105	52	50	535	51	10

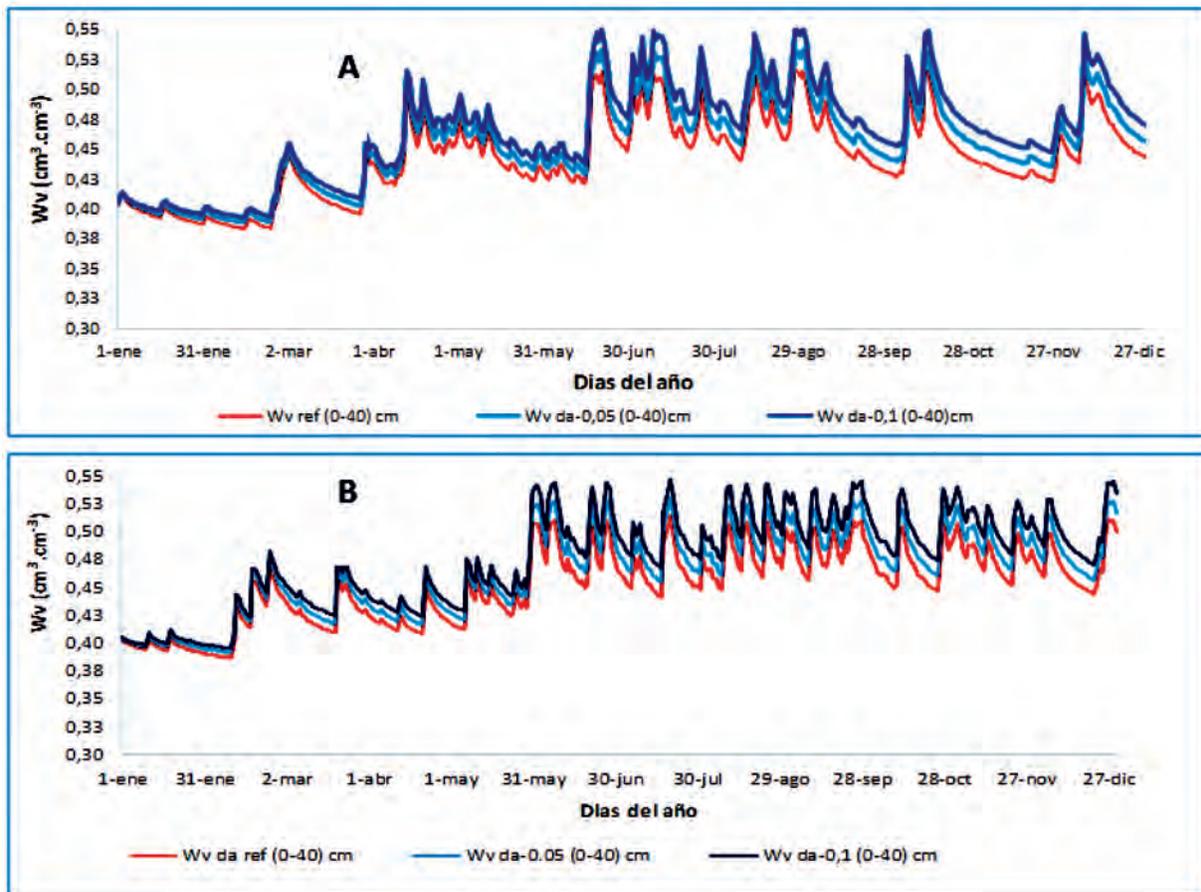


FIGURA 3. Variación de la dinámica de humedad en el suelo Ferralítico rojo compactado modelada para diferentes valores de la densidad aparente y para dos condiciones climáticas: A- año seco y B- año húmedo.

El análisis estadístico de la comparación de las humedades volumétricas diarias modeladas con los parámetros de las propiedades físicas e hidráulicas de referencia con los modificados a partir de la disminución de la densidad aparente, se resume en la Tabla 5.

Como se puede apreciar, tanto para el año seco como para

el año húmedo, hay diferencias entre las medias para cada condición estructural modelada así como en los valores máximos y mínimos y la alta significación de la prueba T-Student demuestra que las humedades comparadas son estadísticamente diferentes, por lo que es válido el análisis que se hace a continuación a partir de las diferencias en estos valores.

TABLA 5. Análisis estadístico de la comparación de las humedades volumétricas diarias del suelo Ferralítico rojo compactado para las diferentes condiciones estructurales y climáticas simuladas

Estadígrafos	Wv 0-40 cm da referencia	Wv 0-40 cm da-0,05g cm ⁻³	Wv 0-40 cm da-0,1 g cm ⁻³
A O SECO			
media	0,443	0,454	0,465
máximo	0,516	0,533	0,551
mínimo	0,384	0,389	0,393
varianza	0,0011	0,0014	0,0017
Desv. Absoluta	0,0269	0,0300	0,0335
Prueba T-Student		0,0000127	0,000119
A O HÚMEDO			
media	0,453	0,465	0,476
máximo	0,513	0,530	0,547
mínimo	0,387	0,391	0,395
varianza	0,0011	0,0014	0,0018
Desv. Absoluta	0,0279	0,0315	0,0357
Prueba T-Student		0,0000041	0,000049

Comportamiento de la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas en el perfil del suelo modelado

Para este análisis se considera solamente el comportamiento del año seco ya que es el de mayor interés para el manejo de la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas con fines de riego y por las mismas razones la valoración se hace diferenciada para el periodo poco lluvioso (noviembre - abril) y el periodo lluvioso (mayo-octubre).

En la Figura 4A se presenta el análisis del comportamiento de la lámina de agua almacenada en la capa de 0-40 cm en el perfil de suelo modelado para el periodo seco. Se compara esta lámina con la correspondiente a los límites máximos y mínimos de la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas y para el caso del límite inferior, además del límite considerado como óptimo para la mayoría de los cultivos (85% Cc o p=0,5), se analizaron otros dos límites inferiores (90% Cc o p=0,3 y 95% Cc o p=0,1) para cubrir toda la gama de manejos de riego que se pudieran realizar, desde el superficial hasta el localizado.

Como puede apreciarse, en el periodo de enero a febrero es donde se tienen los menores valores de la lámina almacenada y con la disminución de la densidad aparente a 0,1 g.cm⁻³ se logra un aumento significativo del almacenamiento del agua que permite que ésta se encuentre en el rango óptimo de disponibilidad para la mayoría de los cultivos. En otros meses del periodo seco como noviembre y marzo-abril, los aumentos del almacenamiento del agua con la disminución de la densidad permitirán aumentar la disponibilidad del agua para las plantas aun para los límites inferiores más altos, correspondientes a riegos de alta frecuencia como el riego localizado.

Un análisis similar para el periodo lluvioso (Figura 4B) muestra que aunque el aporte de las lluvias favorece una mayor disponibilidad del agua almacenada en el suelo para las plantas, se tienen afectaciones en los meses de mayo-junio y septiembre-octubre y con las variaciones simuladas de la densidad aparente se logra también un aumento significativo del

almacenamiento del agua que permite que ésta se encuentre en el rango óptimo de disponibilidad para la mayoría de los cultivos y en el periodo de julio-agosto permitirá aumentar esta disponibilidad aun para los límites inferiores más altos, lo cual indica un mayor aprovechamiento del agua de lluvia en todo este periodo.

En las Tablas 6 y 7 se presenta un resumen de la cantidad de días donde la disponibilidad del agua en el suelo va a estar por debajo de los límites inferiores considerados y el por ciento que representan del total de días del periodo seco o lluvioso respectivamente. A estos días se les ha denominado “días de estrés” y permitirán tener una primera aproximación de en cuánto podría disminuir la necesidad de riego para el periodo seco y lluvioso de un año seco, si se producen los cambios estructurales simulados.

Como se observa en la Tabla 6, durante el periodo seco, a medida que se disminuye la densidad aparente puede lograrse una disminución de los “días de estrés” entre 20%-30%, en dependencia del límite inferior considerado para la disponibilidad y una disminución apreciable del porcentaje que éstos representan del total de días del periodo (entre 10%-24%).

Esto resulta importante al considerar que puede esperarse, con las modificaciones estructurales simuladas, una disminución de las necesidades de riego durante el periodo seco, el cual se considera como la campaña óptima de riego y de producción de los cultivos temporales. Si se toma como norma neta promedio para estos cultivos la de 3000 m³.ha⁻¹, pueden estimarse reducciones de 600-900 m³.ha⁻¹ en este periodo, lo que representa como promedio una posible reducción de 2 a 4 riegos durante la campaña.

Un análisis similar para el periodo lluvioso (Tabla 7) evidencia que los “días de estrés” disminuyen en mayor medida con respecto a los del periodo seco, lo cual implica una mayor capacidad del suelo para el almacenamiento del agua de lluvia y una reducción de la necesidad del riego entre 90%-35% en dependencia del límite inferior considerado para la disponibilidad.

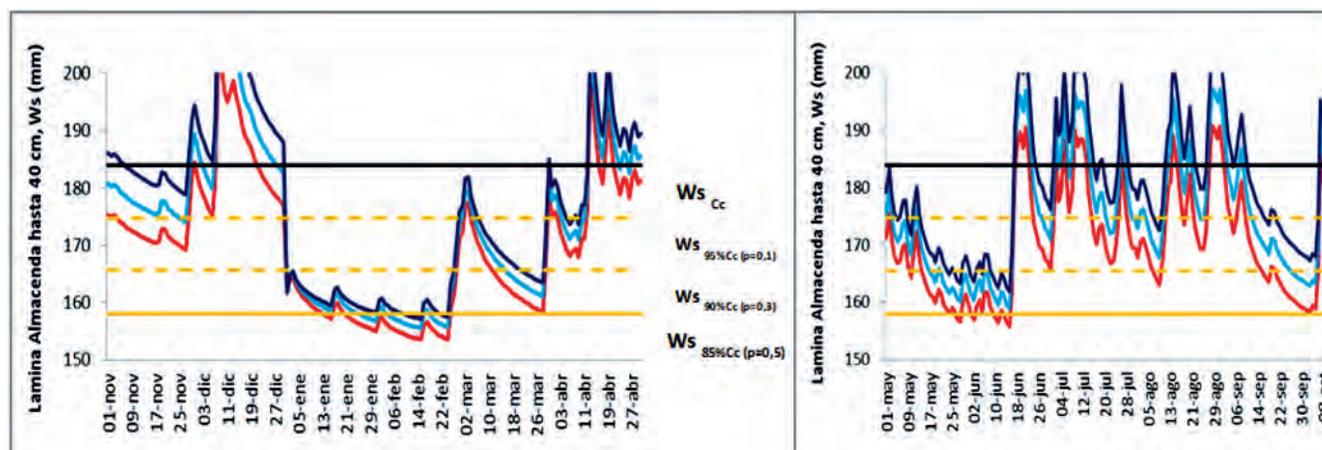


FIGURA 4. Modelación de la disponibilidad del agua almacenada en las capas superficiales del perfil del suelo Ferralítico rojo compactado considerando diferentes valores de densidad para: A- periodo poco lluvioso y B- periodo lluvioso, ambos de un año seco.

TABLA 6. Comportamiento de los días de estrés esperados para diferentes límites inferiores del agua aprovechable en el suelo para las plantas ($W_{s,Lp}$), para diferentes valores de densidad en el **periodo poco lluvioso** de un año seco

Condición de simulación	Considerando $W_{s,Lp} = 85\% W_{s,Cc}$ ($p=0,5$)		considerando $W_{s,Lp} = 90\% W_{s,Cc}$ ($p=0,3$)		considerando $W_{s,Lp} = 95\% W_{s,Cc}$ ($p=0,1$)	
	total días estrés	% total días periodo	total días estrés	% total días periodo	total días estrés	% total días periodo
Ws ref	68	38	97	54	142	79
Ws $da-0,05$	60	33	80	44	127	71
Ws $da-0,01$	51	28	76	42	99	55
Variación (%)	25	10	22	12	30	24

TABLA 7. Comportamiento de los días de estrés esperados para diferentes límites inferiores del agua aprovechable en el suelo para las plantas ($W_{s,Lp}$), para diferentes valores de densidad en el **periodo lluvioso** de un año seco

Condición de simulación	Considerando $W_{s,Lp} = 85\% W_{s,Cc}$ ($p=0,5$)		considerando $W_{s,Lp} = 90\% W_{s,Cc}$ ($p=0,3$)		considerando $W_{s,Lp} = 95\% W_{s,Cc}$ ($p=0,1$)	
	total días estrés	% total días periodo	total días estrés	% total días periodo	total días estrés	% total días periodo
Ws ref	45	24	106	59	148	82
Ws $da-0,05$	19	10	66	37	126	70
Ws $da-0,01$	3	2	43	24	96	53
Variación (%)	93	22	59	35	35	29

Comportamiento de la infiltración y redistribución de la humedad en el perfil del suelo modelado

Si se analizan los valores de la lámina infiltrada y almacenada en la capa de 0-40 cm durante las primeras horas del evento de precipitación hasta las 72 horas posteriores al mismo, para las dos condiciones simuladas, se puede apreciar que en la condición de referencia se tiene una lámina infiltrada y retenida de 18 mm, mientras que en la condición de disminución de la densidad se podrían infiltrar y retener en esta capa 24 mm en este mismo intervalo de tiempo, lo cual apunta a que puede

esperarse con esta modificación estructural incrementos en la capacidad de infiltración del suelo de cerca del 30%.

Un análisis similar al realizado para la lámina almacenada, de las diferencias en los flujos de agua que drenan desde la capa de 0-40 cm, permite identificar una reducción de más del 40% de este flujo en la condición de disminución de la densidad aparente, lo que apunta a que el proceso de redistribución de la humedad se hace más lento para esta condición estructural, a partir de la disminución más brusca de la conductividad hidráulica con el decrecimiento de la humedad, como ya se analizó anteriormente.

Esta predicción de la disminución de la necesidad del riego y el aumento de la capacidad de infiltración y del aprovechamiento del agua de lluvia, cuando se producen cambios estructurales en las capas superficiales del suelo, ha sido planteada por otros autores que abordan las prácticas de la agricultura de conservación. En este sentido Friedrich (2017) plantea que la adopción de prácticas de agricultura de conservación trae ventajas ya que se crea una mejor capacidad de infiltración del agua en los suelos en caso de lluvias torrenciales y una mejor capacidad de almacenar agua en el suelo en caso de sequías, resultando en menores problemas de escorrentía, inundaciones y erosión, pero también en menos cosechas destruidas por sequías.

CONCLUSIONES

- Las modificaciones estructurales simuladas con la herramienta MACRO en las capas superficiales del perfil del

suelo Ferralítico Rojo compactado, permitieron modelar las posibles variaciones de sus propiedades hidráulicas y los cambios en su funcionamiento hídrico.

- La disminución simulada de la densidad volumétrica o aparente, como efecto del cambio estructural en las capas superficiales del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado, podría favorecer un incremento de la capacidad de retención del agua de hasta un 15% en estas capas.
- La mayor capacidad de retención del agua de lluvia que se puede esperar en las condiciones simuladas, apunta a una posible disminución de las necesidades de riego, entre 30%-20% para el periodo seco y entre 90%-35% en el periodo húmedo, en dependencia del manejo del riego que se requiera.
- Pueden esperarse además, con las modificaciones estructurales simuladas, incrementos en la capacidad de infiltración del suelo de cerca del 30% y un proceso de redistribución de la humedad más lento, lo que asegura una mayor disponibilidad del agua para las plantas en las capas superficiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, edit. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, Ed. FAO, Roma, 2006. ISBN-92-5-304219-2.
- BARRALES, V; PEÑA, R. y FERNÁNDEZ, P.: "Validación de modelos: un enfoque aplicado". Chillán, Chile, *Agríc. Téc.* 64(1) enero, 2004. ISSN 0365-2807, DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072004000100008>.
- CANDELARIA, M; RUIZ, O; GALLARDO, F; PÉREZ, P; MARTÍNEZ, A. y VARGAS, L.: "Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura". *Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2011): 999-1010, 2011. ISSN- 1870-0462.
- CHATERLÁN, Y.; LEÓN, M.; DUARTE, C.; PAREDES, P.; LOPEZ, T. y PEREIRA, L. S.: "Determination of crop coefficients for horticultural crops in Cuba through field experiments and water balance simulation", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(1): 90-95, 2010. ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J. y RUÍZ, M.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 42-46, 2011. ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- FRIEDRICH, TH.: "Manejo Sostenible de Suelo con Agricultura de Conservación. Significado para el cultivo de Arroz". *Revista Ingeniería Agrícola*, 7(1): 3-7 (enero-febrero-marzo), 2017. ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
- KUMAR, R. y SINGH, J.: "Regional Water Management Modeling for Decision Support in Irrigated Agriculture". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 129(6): 432-439, November/December, 2003. ISSN: 0733-9437.
- LÓPEZ, T.; DUEÑAS, G.; SIERRA, J.; OZIER-LAFONTAINE, H.; GONZÁLEZ, F.; GIRALT, E.; CHATERLÁN, Y. y CID, G.: "Simulación del manejo del riego y la fertilización nitrogenada del maíz sobre suelo Ferralítico del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 59-66. 2001. ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- LÓPEZ, T.; HERRERA, J.; GONZÁLEZ, F.; CID, G. y CHATERLÁN, Y.: "Eficiencia de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del rendimiento del maíz en la región del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3): 1-6. 2009. ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- RODRÍGUEZ, J. y LÓPEZ, T.: "Validación y Análisis de Sensibilidad del Modelo MACRO en un Suelo Orthic Ferrasol del Sur de la Habana". *Investigación Agraria: Economía* 15(1-2): 47-55, 2000. ISSN: 0213-635X.
- RUIZ, M; MEDINA, H. y HERRERA, J.: "Métodos empleados en Cuba para determinar las propiedades hidráulicas de suelos". *Terra Latinoamericana*, ISSN: 0187-5779, 24(3): 311-318 (julio-septiembre), 2006.
- SINGH, R y DATTA, B.: *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(2): 101-109 (March/April), 2006. ISSN: 1084-0699.
- STENEMO, F Y N. JARVIS: *Guía de Usuario Macro 5.0: Un Modelo para el Flujo de Agua y el Transporte Solutos en el Macroporo del Suelo*, 29pp., Swedish University of Agricultural Science. Dept. Soil Science. Division Environmental Physics, Sweden, 2003.

Recibido: 23/11/2017.

Aprobado: 28/02/2018.

Teresa López, Investigadora Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba. Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Elvis Santiesteban, Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Felicita González, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Yoima Chaterlan, Correo electrónico: jdptoambiente@iagric.cu

Greco Cid, Correo electrónico: dptoambiente1@iagric.cu

Julián Herrera, Correo electrónico: direccioninvest1@iagric.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.