

EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DIRECTA E INVERSA DEL CAMBIO DEL FLUJO Y LIXIVIACIÓN DEL SUELO CON UN CULTIVO DE CUBIERTA DE VERANO EN EL SUR DE FLORIDA

A. Ritter¹, R. Muñoz-Carpena², D. Bosch³, B. Schaeffer⁴ y Potter³

¹ Instituto Canario Inv. Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife; aritter@icia.es.

² Agric. and Bio. Engineering Dept. Univ. of Florida. 101 Frazier Rogers Hall, PO Box 110570 Gainesville, FL 32611 (USA)

³ USDA-ARS, SEWRL, 2375 Rainwater Road, PO Box 748, Tifton, GA 31794 (USA)

⁴ TREC-University of Florida, 18905 SW 280 St, Homestead, FL 33031 (USA)

RESUMEN. Este trabajo presenta un estudio para evaluar el impacto del maíz dulce de invierno (*Zea mays* L.) en la calidad del agua subterránea, así como para determinar la efectividad del uso de un cultivo de cubierta leguminoso, estival (*Crotalaria juncea*) para reducir dicho impacto bajo las condiciones subtropicales del sur de Florida. Dentro de una finca de 4 ha en la zona agrícola del sur de Florida se establecieron seis parcelas en las que se recogieron datos de entradas y salidas de agua y nitrógeno a lo largo de un periodo de tres años. Durante la época estival se plantó crotalaria como cultivo de cubierta en tres de las parcelas, mientras que las otras tres se dejaron en barbecho. Mediante un modelo numérico (WAVE) se realizó la simulación de los balances de agua y nitrógeno en la zona no saturada del suelo. Los parámetros hidráulicos del modelo se optimizaron mediante simulación inversa a partir de medidas de humedad de suelo a tres profundidades. Con estos parámetros las predicciones del modelo fueron satisfactorias (coeficientes de eficiencia de 0.85 y 0.91 en las parcelas con y sin cultivo de cubierta, respectivamente). Los parámetros que condicionan la dinámica del nitrógeno en el suelo se obtuvieron por estimación directa de acuerdo con la sensibilidad de la respuesta del modelo a éstos. Los resultados indican que el uso de la crotalaria produjo una mejora en las propiedades hídricas del suelo, en la evapotranspiración del maíz y la reducción del flujo hacia el agua subterránea. Sin embargo, también contribuyó al aumento de lixiviación de nitratos hacia el acuífero. En consecuencia, el aumento del contenido de nitrógeno del suelo como resultado del uso de un cultivo de cubierta leguminoso estival debe ir acompañado de una reducción en la fertilización nitrogenada del cultivo de invierno para disminuir la lixiviación del nitrógeno.

ABSTRACT. This study was designed to measure the impact of sweet corn (*Zea mays* L.) production under South Florida subtropical conditions on groundwater quality and to determine the extent to which this impact may be reduced by use of the leguminous summer cover crop sunn-hemp (*Crotalaria juncea*) as a potential best management practice. Water and nitrogen (N) inputs and outputs were

measured during three corn seasons in an experimental field divided in six plots. Three of them were rotated with sunn-hemp in the summers, before the winter corn seasons (CCC plots), while the other three were kept fallow (SCC plots). Crop management was identical in both types of plots during the winter seasons. A numerical model (WAVE) for describing water and agrochemicals movement in the soil was used to simulate water and N balances in both types of plots during the last two seasons. Soil moisture data at three depths continuously measured during the two corn seasons were used to calibrate the hydrodynamic component of WAVE. Model performance was successfully tested, yielding coefficients of efficiency of 0.85 and 0.91 for CCC and SCC plots, respectively. The parameters involved in the N balance were obtained by direct methods. This study indicates that although the sunn-hemp cover crop resulted in an improvement in the soil physical conditions and subsequent enhanced crop evapotranspiration and soil drainage reduction, it can also result in net increases of N leaching loadings towards the shallow aquifer. The use of this summer leguminous cover crop must be coupled with a reduction in the winter crop N fertilization to account for the net increase in soil N content.

1. Introducción

La región agrícola del condado de South Miami-Dade en el sur de Florida (EEUU) ocupa un área ambientalmente sensible entre dos parques nacionales: los Everglades y Biscayne. La actividad agrícola en esta zona ha sido considerada como una amenaza para los frágiles ecosistemas naturales de estos parques nacionales. Sin embargo, una agricultura acorde con determinados estándares ambientales se contempla actualmente como alternativa viable al establecimiento de malas hierbas exóticas o a la extensión urbanística descontrolada de Miami. Los cultivos en esta zona (hortícolas, plantas ornamentales y frutales tropicales) ocupan una extensión aproximada de 32.4 km² al sur de la ciudad de Miami, entre

ambos parques nacionales y contribuyen significativamente al empleo y a la economía de la región. La baja fertilidad de sus suelos y la alta incidencia de plagas y enfermedades en esta zona, condiciona la obtención de producciones económicamente sostenibles al uso de fertilizantes y pesticidas. Esto confiere a las prácticas agrícolas un alto potencial como fuente de contaminación difusa del acuífero no confinado sobre el que se encuentra toda la región y que proporciona agua potable para la mayoría de la población que reside en el sudeste de Florida. En este sentido, surge la necesidad de estudiar el impacto que el uso de agroquímicos tiene sobre los recursos hídricos para poder evaluar así los costes y ventajas ambientales que supone la agricultura en esta zona.

Una práctica de manejo recomendada en la región agrícola de Miami-Dade es la de mantener un cultivo de cubierta como alternativa al barbecho, incorporando luego al suelo los residuos de este cultivo antes del comienzo de la siguiente época de cultivo. La crotalaria (*Crotalaria juncea*) es un cultivo de cubierta potencialmente adecuado para este área, porque tiene una gran capacidad para producir biomasa (Li et al., 1999) y proporciona así una cubierta densa.

Este trabajo evalúa mediante modelado la eficacia del uso de la crotalaria, como cultivo de cubierta de verano, para reducir el flujo y los lixiviados que resultan del cultivo de maíz dulce de invierno (*Zea mays* L.) en la zona del sur de Florida. Se utilizó el modelo numérico WAVE (Vanclouster et al., 1996) para la simulación del balance de agua y nitrógeno (N) en la zona no saturada. Los parámetros hidráulicos de van Genuchten-Mualem se obtuvieron por simulación inversa usando el algoritmo de optimización global Multilevel Coordinate Search combinado secuencialmente con el algoritmo Nelder-Mead Simplex (GMCS-NMS). Los parámetros restantes se obtuvieron por estimación directa de acuerdo con la sensibilidad del modelo a éstos.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

El estudio se realizó en una finca de 4 ha situada en el Tropical Research and Education Center (TREC) de la Universidad de Florida. Este centro se encuentra dentro de una zona agrícola de 32.4 km² al noroeste de la ciudad de Homestead. El suelo en la finca es de tipo Krome (USDA-NRCS, 2004). Estos son suelos artificiales, poco profundos que resultan de la roturación y arado de la roca caliza característica del subsuelo de la zona.

Dentro de la finca se establecieron seis parcelas experimentales (47 x 27 m cada una) en las que en los meses de invierno se cultivó maíz dulce durante un período de cuatro años. En tres de las parcelas (seleccionadas aleatoriamente) se utilizó durante el verano crotalaria como cultivo de cubierta (Fig. 1). Hay que resaltar que este estudio se centra solamente en las dos últimas campañas de cultivo que denominaremos Campaña 3 y Campaña 4, respectivamente. El cultivo se realizó siguiendo las

prácticas de los cultivadores de la zona. El sistema de riego empleado fue por aspersión.

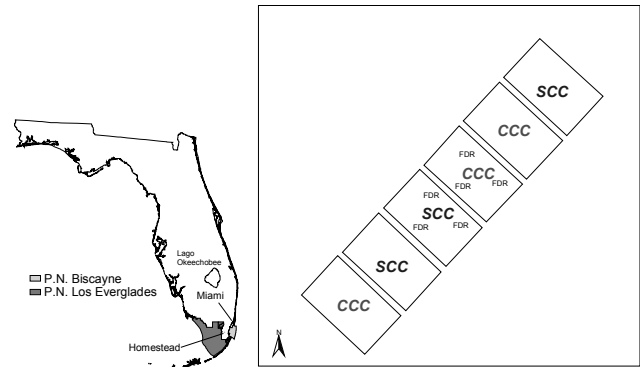


Fig. 1. Distribución de las parcelas según tratamiento (SCC, CCC) y sondas FDR de humedad de suelo.

Con respecto de los datos meteorológicos para el periodo de estudio (2001-2003), éstos se obtuvieron de la estación situada en el TREC a menos de 700 m de la finca de estudio y que pertenece a la red de estaciones meteorológicas FAWN de la Universidad de Florida (<http://fawn.ifas.ufl.edu>). Se utilizó el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para el cálculo de la evapotranspiración potencial diaria. Para el seguimiento del contenido de humedad de suelo a tres profundidades (0.15, 0.25 y 0.35 m) se instalaron seis sondas FDR, Frequency Domain Reflectometry (EnviroScan system, Sentek Sensor Technologies). Las sondas se distribuyeron en dos parcelas, cada una correspondiente a ambos tratamientos (Fig. 1): con cultivo de cubierta (CCC) y sin cultivo de cubierta (SCC). Las lecturas obtenidas se corrigieron mediante una calibración específica del suelo y para cada profundidad se calculó el promedio de los valores medidos con las tres sondas FDR situadas en cada parcela.

Las propiedades físicas de la capa superior del suelo se obtuvieron mediante muestreos superficiales (0-0.30 m) en ambos grupos de parcelas. La textura se determinó según Miller y Miller (1987). A partir del carbono y nitrógeno orgánicos obtenidos en las muestras con un analizador Carlo-Erba Model NA 1500 II se calculó la relación C/N. La densidad y la porosidad se obtuvieron a partir de seis muestras inalteradas recogidas en anillos de 0.10 m de diámetro siguiendo los métodos estándar (Blake y Hartge, 1986; Danielson y Sutherland, 1986).

2.2. Modelo numérico WAVE

La simulación directa e inversa se realizó mediante el modelo mecánico-determinístico WAVE (Vanclouster et al., 1996) que describe el transporte vertical de agua, solutos no reactivos, formas de nitrógeno y pesticidas en el suelo y en la planta. WAVE está estructurado en cinco módulos. El módulo de agua describe el flujo transitorio solucionando numéricamente el esquema conservativo de la ecuación de Richards propuesto por Celia et al. (1990) más un término sumidero que describe la absorción de agua por las raíces de la planta. La curva de retención de humedad se

considera descrita por el modelo de van Genuchten (1980), mientras que la función de conductividad hidráulica no saturada se describe con el modelo de Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980). Considerando condiciones de equilibrio (homogeneidad y mezcla perfecta de solutos), la simulación del movimiento del N en el suelo se basa en la ecuación de convección-dispersión (Biggar y Nielsen, 1967). La adsorción de especies de nitrógeno se considera un proceso linear, instantáneo y reversible, siendo constante la relación entre las concentraciones en la fase adsorbida y la fase líquida. El modelo WAVE también tiene en cuenta las transformaciones de diversas especies de nitrógeno: N orgánico, nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). La nitrificación de NH_4^+ , la desnitrificación de NO_3^- y la hidrólisis de urea se estiman considerando reacciones cinéticas de primer orden. La absorción de NH_4^+ y de NO_3^- por la planta están restringidas a unas intensidades de absorción potenciales. La mineralización de N orgánico y la inmovilización de N inorgánico se modelan usando el concepto de tres compartimentos del suelo: residuos vegetales, humus y estiércol). El efecto de la temperatura y del contenido de humedad del suelo se incluyen mediante un factor de reducción de las intensidades potenciales de transformación de las especies de N.

2.3. Parametrización del modelo

El espesor de la zona no saturada simulado se estableció en 0.90 m distinguiendo entre dos capas distintas. Los primeros 0.20 m constituyen la capa de suelo (roca-arada) y el espesor restante (0.2-0.9 m) es la roca caliza. La condición de contorno para el límite inferior del perfil se estableció como drenaje por gravedad. Considerando que las raíces colonizan el suelo y pueden llegar a extenderse

algunos centímetros en la capa de roca caliza, la profundidad máxima de raíces se fijó en 0.30 m. La utilización del modelo WAVE para simular el flujo y transporte del nitrógeno supone estimar un gran número de parámetros. La optimización inversa simultánea de todos estos parámetros resulta inadecuada por lo que se procedió a identificar aquellos parámetros con mayor influencia en la respuesta del modelo. Esto se hizo mediante un análisis de sensibilidad basado en el coeficiente de sensibilidad propuesto por Wösten et al. (1990). Según la Tabla 1 que indica la sensibilidad de WAVE a los parámetros estudiados, los parámetros hidráulicos de van Genuchten-Mualem, θ_s , α , n y K_s se seleccionaron para su optimización inversa. En cuanto al resto de los parámetros, parte de ellos se midieron y parte se estimaron de acuerdo con la literatura existente. La función del índice de superficie de foliar (LAI) para el maíz dulce en el área se obtuvo de Knisel y de Davis (1999) a partir de valores medidos en muestras recogidas en la región sudoeste de los EEUU. La época de crecimiento se dividió en 10 tramos iguales con valores de LAI de 0.0, 0.09, 0.18, 0.22, 0.40, 1.05, 2.8, 2.85, 2.9, 1.8, y 0.0 m^2/m^2 , respectivamente. Para el coeficiente de cultivo (K_c) del maíz dulce en el área se tomaron valores de 0.6, 1.0, 1.1, 1.0 para cada mes (Diciembre-Marcha) (Smajstrala, 2001). Tanto en el caso del LAI como del K_c , WAVE utiliza interpolación lineal para calcular valores intermedios. El contenido residual de agua en el suelo (θ_r) para los primeros 0.20 m se determinó por gravimetría a partir de tres muestras de suelo inalteradas (0.25 m de diámetro y altura). El mismo valor también se asignó a la capa de roca caliza. Debido a la baja variabilidad en campo del contenido de agua a saturación (θ_s) (Warrick y Nielsen, 1980), este parámetro en la capa de suelo se consideró igual a la porosidad medida.

Tabla 1. Parámetros del modelo WAVE: estimación y sensibilidad del modelo

Descripción	Sim.	Proceso	Sensibilidad ^a	Valor ^b	Estimación ^c
Coefficiente de cultivo (-)	K_c	Evapotranspiración pot. del cultivo	alta	[0.6-1.1]	med
Contenido de humedad en saturación (m^3m^{-3})	θ_s	Curva retención de van Genuchten	alta	0.47/~ ^c	med/opt
Parámetro de forma (pendiente (-))	n	Curva retención de van Genuchten	alta	~	opt
Coefficiente de distribución de NH_4^+ (m^3T^{-1})	K_d	Adsorción de NH_4^+	media	0.8	lit_C
Absorción máxima de N (kg ha^{-1})	N_{max}	Balance de nitrógeno	media	200	lit_A
Índice de superficie foliar (-)	LAI	Transpiración potencial	media	[0-2.9]	med
Contenido de humedad residual (m^3m^{-3})	θ_r	Curva retención de van Genuchten	baja	0.092	med
Intensidad descomposición de humus (día^{-1})	k_{hum}	Balance de nitrógeno	baja	0.00007	lit_D
Eficiencia de transformación de carbono (-)	f_e	Balance de nitrógeno	baja	0.3	lit_D
Conductividad hidráulica saturada (m día^{-1})	K_s	Conductividad hidráulica insaturada	baja	~	opt
Inversa de la presión de burbujeo (m^{-1})	α	Curva retención de van Genuchten	baja	~	opt
Intensidad descomposición residuos vegetales (día^{-1})	k_{lit}	Balance de nitrógeno	baja	0.0099	lit_D
Relación C/N (-)	r_o	Balance de nitrógeno	baja	16/19 ^d	med
Intensidad descomposición estiércol (día^{-1})	k_{man}	Balance de nitrógeno	baja	0.002	lit_D
Intensidad de nitrificación (día^{-1})	k_{nitri}	Balance de nitrógeno	baja	1.0	lit_D
Fracción de humificación (-)	f_h	Balance de nitrógeno	baja	0.4	lit_D
Dispersividad hidrodinámica (m)	λ	Transporte convectivo-dispersivo	baja	0.017	lit_D
Conectividad de poro (-)	λ^*	Conductividad hidráulica insaturada	baja	0.5	lit_B
Intensidad máxima de absorción de agua (día^{-1})	S_{max}	Absorción de agua por las raíces	baja	0.023	lit_D
Intensidad de desnitrificación (día^{-1})	k_{denit}	Balance de nitrógeno	baja	0.01	lit_D
Densidad aparente (T m^{-3})	ρ_b	Adsorción de NH_4^+	baja	1.41	med

^a Sensibilidad del modelo (SC) calculada según Wösten et al. (1990), donde "alta": $SC > 1$, "media": $0.5 < SC < 1$ y "baja": $SC < 0.5$. ^b ~ indica parámetro estimado por simulación inversa. ^c En la capa de suelo θ_s se consideró igual a la porosidad, pero en la roca caliza se optimizó. ^d $r_o = 16$ y 19 para las parcelas CCC y SCC, respectivamente; ^e "med": medido; "opt": optimizado por simulación inversa y "lit_": valor obtenido de la literatura (lit_A de Hochmuth (2000); lit_B de Mualem (1976); lit_C de Shinde et al. (2001) y lit_D de Vanclouster et al. (1996)).

Tabla 2. Variables de entrada del modelo (climáticas y de manejo del cultivo del maíz) para Campaña 3 (2001-2002) y Campaña 4 (2002-2003)

Fecha	P (mm)	R (mm)	ET _c (mm)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Fertilización nitrogenada (kg ha ⁻¹)				
						Urea	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Total N inorgánico	N orgánico
Nov 2001	0	39	11	14.5	26.2	1.3	27.6	1.3	30.2	5.6
Dic 2001	39	160	43	15.7	26.1	26.7	22.4	5.9	55.0	39.2
Ene 2002	26	138	91	13.2	25.7	26.7	22.4	5.9	55.0	39.2
Feb 2002	104	121	95	14.3	25.2					
Mar 2002	27	16	126	17.4	27.2					
Campaña 3	197	474	355	15.0	26.1	54.7	72.3	13.1	140.1	84.1
Dic 2002 ^b	53	164	41	14.5	24.8	5.4	132.6	29.1	166.8	22.4
Ene 2003	10	140	83	9.3	22.0	2.7	55.1	2.7	60.5	11.2
Feb 2003	43	104	101	14.9	26.8					
Mar 2003	129	52	120	18.7	29.4					
Campaña 4	235	460	346	14.3	25.8	8.1	187.4	31.8	227.3	33.6

^a P: Precipitación; R: Riego; ET_c: Evapotranspiración potencial del cultivo; T_{min} y T_{max}: temperaturas medias de mínimas y máximas, respectivamente.

^b La fertilización en diciembre de 2002 se repartió en cinco días.

Sin embargo, para el caso de la roca caliza (cuyas propiedades son difíciles de medir debido a la dificultad para tomar muestras), este parámetro fue optimizado. Los parámetros n y α del modelo de van Genuchten para la curva de retención de agua del suelo también se optimizaron para poder detectar posibles cambios en la retención del agua como consecuencia del uso del cultivo de cubierta.

La conductividad hidráulica saturada, K_s , es un parámetro con gran variabilidad de campo (Warrick y Nielsen, 1980) por lo que también fue optimizado en ambas capas. El resto de parámetros de la Tabla 1 se midieron o bien se tomaron de la literatura (Vanclooster et al. 1996; Hochmuth, 2000; Li et al. 2002; Valenzuela y Fox, 2005). Hay que resaltar que el tomar valores de la literatura implica un mayor grado de incertidumbre en la salida del modelo. Sin embargo, desde un punto de vista cualitativo y para comparación de escenarios, creemos que este procedimiento es válido. El proceso de optimización inversa de los parámetros hidráulicos seleccionados para el suelo y la piedra caliza (θ_s , α , n y K_s) se realizó de forma independiente para cada grupo de parcelas CCC y SCC. Para ello se utilizaron las series temporales de datos de humedad de suelo medidos a las profundidades 0.15, 0.25 y 0.35 m. En primer lugar se realizó simulación inversa para los parámetros seleccionados del suelo y la roca caliza en las parcelas SCC. Luego se optimizaron los parámetros de las parcelas CCC, utilizando para la roca caliza los mismos parámetros que los obtenidos para las parcelas SCC. Como con el uso del cultivo de cubierta, era de esperar un aumento del contenido de materia orgánica y por lo tanto un cambio en la capacidad de retención de agua del suelo, en las parcelas CCC los parámetros hidráulicos seleccionados se optimizaron para cada una de las dos campañas de cultivo consideradas. Para el proceso de simulación inversa se utilizó sólo una parte de los datos de humedad disponibles (aquellos periodos que exploran el intervalo más amplio de condiciones de humedad en el suelo), dejando el resto para verificación de la efectividad del modelo.

Tanto para la simulación directa como inversa, se utilizaron las variables climáticas y de manejo cuyos valores promedios y totales mensuales se resumen en la

Tabla 2. Como se observa en esta tabla las aplicaciones de fertilizantes fueron comunes en las parcelas SCC y CCC. En lo que respecta a la simulación de la dinámica del N en el suelo, hay que indicar que el contenido de N orgánico se determinó de acuerdo con los análisis realizados en muestras de suelo tomadas al principio de cada campaña de cultivo del maíz dulce (Tabla 3).

Tabla 3. Nitrógeno orgánico (%) medido en muestras de suelo durante el periodo experimental.^a

Fecha	Parcelas SCC	Parcelas CCC	% Δ ^b
Nov 2000	0.06±0.01	0.06±0.00	--
Nov 2001	0.07±0.01	0.10±0.01	30 %
Mar 2003	0.07±0.00	0.09±0.00	22 %

^a Media ±desviación típica. ^b % Δ : Incremento en CCC con respecto a SCC.

2.4. El procedimiento de simulación inversa

La estimación inversa de los parámetros hidráulicos seleccionados se formuló como un problema de optimización no lineal, donde dichos parámetros se obtienen minimizando la siguiente función objetivo:

$$OF(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^{m_z} \sum_{i=1}^{m_j} [\theta^*(z_j, t_i) - \theta(z_j, t_i, \mathbf{b})]^2 \quad (1)$$

donde el termino de la derecha representa el error entre la humedad observada (θ^*) y la que predice el modelo WAVE (θ) usando el vector de parámetros \mathbf{b} ; m_j es el número de medidas recogidas en cada profundidad z_j y m_z es el número de profundidades de suelo contempladas. Cada medida está ponderada por un peso, w_i , asociado con el error de la misma y que se estableció igual a s_i^{-2} , donde s_i es la desviación típica calculada con los valores de las tres sondas FDR en cada profundidad y en el tiempo t_i . La "adecuación" del modelo y la incertidumbre asociada a los parámetros optimizados se estimaron según Hollenbeck et al. (2000) y Ritter et al. (2004). Como algoritmo de optimización global (para minimizar la función objetivo) se utilizó el GMCS, descrito por Huyer y Neumaier (1999).

Para mejorar el proceso de optimización, el GMCS se acopló secuencialmente con un algoritmo de búsqueda local, NMS, descrito por Nelder y Mead (1965). La bondad de ajuste de las simulaciones con los parámetros optimizados se evaluó mediante inspección visual de la humedad de suelo observada y predicha por el modelo, así como mediante el coeficiente de eficiencia, C_{eff} (Nash y Sutcliffe, 1970) y la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del suelo

La Tabla 4 resume las propiedades físicas de la capa superior del perfil que resultan del análisis de las muestras de suelo recogidas. Esta capa delgada de suelo (0-0.20 m) obtenida mediante roturación y arado de la roca caliza muestra un 51% de grava y un 49% de material fino. Este material fino es consecuencia del cultivo continuo sobre el material original y proporciona características hídricas particulares de la capa superficial de suelo.

Tabla 4. Propiedades físicas de la capa de suelo (roca arada)^a

Densidad aparente (T m ⁻³)	Densidad específica (T m ⁻³)	Porosidad (%)	Textura (%): Gravoso-Franco ^c			
			Grava ^b	Arena	Limo	Arcilla
1.41±0.01	2.67±0.01	47±1	51.4	36.6	39.6	23.8

^a Media ±desviación típica; ^b Tamaño de partícula >2mm; ^c USDA.

Los parámetros hidráulicos optimizados mediante simulación inversa para cada capa y para cada tipo de tratamiento (SCC y CCC) se muestran en la Tabla 5. Se observa que la conductividad hidráulica saturada optimizada presenta altos valores en todos los casos (ambas capas y tratamientos). Estudios previos indican también un intervalo de valores altos para K_s , 500-7600 m día⁻¹ (Fish y Stewart, 1991). Los valores optimizados de K_s presentan una alta incertidumbre lo cual sugiere que sería necesario haber incluido otras medidas adicionales de variables hídricas (p.ej. succión o flujo en el perfil del suelo) para mejorar la estimación de este parámetro por simulación inversa (Kool y Parker, 1988; van Dam et al., 1992). En cuanto a la porosidad, el valor obtenido está dentro del intervalo de 35-45% indicado por Fish y Stewart (1991). La inspección visual de las series de humedad de suelo observadas y predichas por el modelo WAVE con los parámetros de la Tabla 5 (resultados no incluidos) indica que el modelo WAVE describe satisfactoriamente el contenido de humedad en el suelo. Esto se confirma con los criterios de ajuste calculados: Para las parcelas con tratamiento SCC el C_{eff} fue de 0.918 y 0.911 en el periodo de calibración y de verificación, respectivamente. El error esperado en las predicciones para ambos periodos fue de $RMSE$ 0.008 y 0.006 m³m⁻³, respectivamente. Igualmente, para el tratamiento CCC en los periodos de calibración y de verificación se obtuvieron C_{eff} = 0.914; $RMSE$ = 0.009 m³m⁻³ y C_{eff} = 0.846; $RMSE$ = 0.009 m³m⁻³, respectivamente. El

efecto del tratamiento CCC se manifiesta mejor en los primeros 0.15 m, donde el contenido de humedad en las parcelas CCC fue considerablemente mayor (0.086 m³m⁻³ de promedio) que en las parcelas SCC. Esto apunta a un cambio en las propiedades hídricas del suelo con el tratamiento CCC que se aprecia en la parte más superficial.

3.2. Balance de agua en el suelo y flujo en la base del perfil

La Fig. 2 muestra las curvas de retención de humedad de suelo para cada capa y tratamiento de acuerdo con los parámetros de la Tabla 5. La roca caliza presenta una porosidad más baja que la capa de suelo. Por otro lado, a medida que aumenta la succión en el suelo, la pérdida de humedad es más rápida en las parcelas SCC que en las CCC. Además se observa que entre campañas de cultivo se produce un aumento en la capacidad de retención de agua en las parcelas con tratamiento CCC. Esto sugiere que después de tres años de rotación continua con el cultivo de cubierta, éste ha introducido cambios observables en el suelo que afectan a las series temporales de humedad de suelo.

Tabla 5. Propiedades hídricas obtenidas por métodos directos e inversos^a

Trat.	Camp.	Capa	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α (m ⁻¹)	n	K_s (m día ⁻¹)
SCC	3 & 4	Roca	0.092	0.406 ±0.046	11.7 ±6.1	1.12 ±0.03	8978 ±4990
SCC	3 & 4	Suelo	0.092	0.470	9.3 ±3.1	1.22 ±0.03	516 ±348
CCC	3	Suelo	0.092	0.470	7.5 ±1.9	1.13 ±0.01	1545 ±968
CCC	4	Suelo	0.092	0.470	20.4 ±3.1	1.09 ±0.002	1054 ±222

^a Los parámetros optimizados por simulación inversa incluyen intervalo de confianza para el 90%.

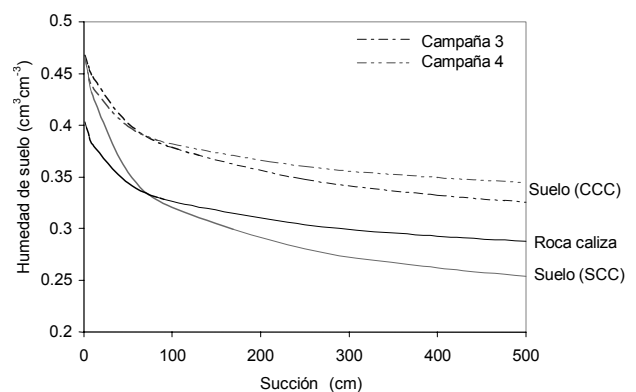


Fig. 2. Curvas de retención de humedad obtenidas por métodos directos e inversos en las diferentes capas del perfil y para cada tratamiento.

La precipitación y el riego durante las dos campañas de cultivo fueron 670 y 695 mm, respectivamente. Las predicciones del modelo con respecto del flujo en la base del perfil (Tabla 6) indican una pequeña reducción en las parcelas CCC en comparación con el tratamiento SCC (-2 y -3% para Campaña 3 y Campaña 4, respectivamente). Este

agua que abandona el perfil del suelo alcanza unos totales que suponen una proporción grande (alrededor del 60%) de toda el agua que ha entrado en el suelo (precipitación+riego). Esto indica claramente el efecto negativo del exceso de riego en esta zona.

La evapotranspiración actual del maíz (ET_a) calculada por WAVE alcanzó valores entre el 52 y 60% de la evapotranspiración potencial (355 y 376 mm para la Campaña 3 y Campaña 4, respectivamente). Durante la Campaña 3, la ET_a en las parcelas SCC fue un 15% superior que en las parcelas CCC, mientras que durante la Campaña 4 la ET_a fue similar en ambos tratamientos. Esto sugiere que durante la Campaña 3 las parcelas CCC tuvieron más agua disponible para evapotranspiración como

consecuencia de la mayor retención de agua en el suelo. Sin embargo, durante la Campaña 4, al haber sido las entradas de agua mayores, no se dieron condiciones limitantes de humedad por lo que la mayor capacidad de retención de agua de las parcelas CCC no fue relevante en la evapotranspiración. El contenido de humedad al final de esta última campaña también incrementó con respecto a la campaña anterior en un 51 y 75% para los tratamientos SCC y CCC, respectivamente. En resumen, el cultivo de cubierta leguminoso dio lugar a una mejora en las condiciones físicas del suelo que se tradujeron en una reducción del flujo en la base del perfil, una mayor ET_a y mayor capacidad de retención de agua.

Tabla 6. Resumen de los resultados de la simulación

Salida del modelo WAVE	Campaña 3			Campaña 4		
	SCC	CCC	%Δ	SCC	CCC	%Δ
ET actual, ET_a (mm)	186	214	13%	207	199	-4%
Flujo hacia el acuífero, D (mm)	431	423	-2%	379	366	-4%
Absorción de N por el maíz (kg ha ⁻¹)	154	176	13%	191	200	5%
Lixiviación de N, L (kg ha ⁻¹)	37	34	-9%			9%
[N] lixiviado, L/D (mg l ⁻¹)	8.6	8.0	-8%	12.9	14.8	13%

%Δ: Incremento en CCC con respecto a SCC.

3.3. Balance del nitrógeno y lixiviación

Debido a que la cantidad de fertilizantes aplicada en ambos tratamientos fue igual, las diferencias que muestran las predicciones de lixiviación de N y la absorción de N por la planta entre las parcelas CCC y SCC (Tabla 6) se pueden atribuir a los cambios introducidos por el cultivo de cubierta en las parcelas CCC: aumento del contenido de N orgánico (Tabla 3) y la consiguiente mineralización de N, así como cambios en las propiedades hídricas del suelo. Llama la atención que con el tratamiento CCC durante la Campaña 4, la cantidad de agua que abandona el perfil disminuyó, pero sin embargo la lixiviación de N experimentó un aumento con respecto del tratamiento SCC (10%). Expresando los lixiviados de N por unidad de flujo que abandona el perfil del suelo, las diferencias entre ambos tratamientos se cuantifican en un 14% para la última campaña. Esto se explica debido a que con el cultivo de cubierta se aumenta la concentración de N del suelo, por lo que si se mantienen las mismas prácticas de abonado, el efecto del cultivo de cubierta es contrario al esperado. Por lo tanto, el uso de la crotalaria como cultivo de cubierta de verano debe ir acompañado de una reducción de la fertilización nitrogenada recomendada para la producción del maíz dulce en este área.

Con el objetivo de verificar las predicciones del modelo WAVE relativas al balance de N, los resultados de las simulaciones se compararon con la siguiente información disponible. Según Valenzuela y Fox (2005) la absorción de N por el maíz dulce bajo condiciones subtropicales y para una producción óptima de 20000 kg ha⁻¹ alcanza los 208 kg ha⁻¹. Las producciones totales del maíz obtenidas en ambas

campañas de cultivo (14100 y 19500 kg ha⁻¹, respectivamente) fueron comparables con las producciones de los cultivadores de la zona (14100-21200 kg ha⁻¹, Li et al., 2002). Aunque la producción obtenida en las parcelas CCC fue aproximadamente un 15% más alta que en las parcelas SCC, no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$). Con base en estas producciones, la absorción de N por el maíz se calculó en 147 y 203 kg ha⁻¹, respectivamente. Estos valores coinciden aproximadamente con los obtenidos en las simulaciones (Tabla 6). Por otro lado, los valores de N orgánico que resultan de la simulación al final de la Campaña 4 (Marzo 2003) coinciden (<9% de diferencia) con los medidos en campo para ambos tratamientos (Tabla 3). Por otro lado, Rao y Li (2003) propusieron una ecuación potencial ($R^2=0.99$) para predecir la intensidad de mineralización de N orgánico procedente de residuos de crotalaria en un suelo de tipo Krome. Aplicando esta ecuación a los datos de este trabajo y suponiendo temperatura ambiente, el total de N orgánico mineralizado después de 15 semanas asciende a 36 kg ha⁻¹. De la simulación con WAVE se obtienen 100 y 84 kg ha⁻¹ de N mineralizado en las parcelas SCC para la Campaña 3 y Campaña 4, respectivamente, mientras que con el tratamiento CCC, estas cantidades ascendieron a 124 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente. La diferencia entre ambos tratamientos se corresponde aproximadamente con los 36 kg ha⁻¹ que resultan de la mineralización de los residuos del cultivo de cubierta incorporados al suelo. Estos datos, apoyan por tanto los resultados obtenidos con el modelo WAVE y las conclusiones que se derivan.

4. Conclusiones

La utilización del modelo numérico WAVE para simular el balance de agua y de nitrógeno (N) en la zona no saturada resultó adecuado para estudiar el impacto del maíz dulce de invierno en la calidad del agua subterránea, así como para determinar la efectividad del uso de un cultivo de cubierta leguminoso, estival para reducir dicho impacto bajo las condiciones subtropicales del sur de Florida. Los datos experimentales se obtuvieron de una finca en la que se establecieron dos tipos de parcelas según su uso en verano: barbecho ó cultivo de cubierta. De acuerdo con los resultados del modelo se observa que después de tres años la rotación continua del maíz con el cultivo de cubierta produjo un cambio en las propiedades hídricas del suelo aumentando la capacidad de retención de agua y reduciendo la conductividad hidráulica saturada. Esto se tradujo en una disminución de los flujos que abandonan el suelo hacia el acuífero y en un aumento de la evapotranspiración actual del maíz.

El uso del cultivo de cubierta afectó igualmente al balance de N, aumentando el contenido de N orgánico en el suelo. Aunque la absorción de N por el maíz y las producciones se incrementaron ligeramente en las parcelas con cultivo de cubierta, también lo hizo la lixiviación de N hacia el acuífero. Esto se explica debido a que el efecto del cultivo de cubierta junto con los aportes fertilizantes dan lugar a un exceso del N disponible en el perfil. Así, la ventaja potencial introducida por la reducción en el flujo hacia el acuífero y la mejora en la evapotranspiración se contrarresta con una mayor cantidad de N lixiviado. En consecuencia, el uso en esta zona de este tipo de cultivos de cubierta leguminosos de verano, debe acompañarse con una reducción de la fertilización de N durante el cultivo del maíz en la época invernal.

Agradecimientos. Los autores quieren agradecer a Michael Gutiérrez y Tina T. Dispenza (TREC) por su ayuda en los trabajos de campo. Este estudio ha sido financiado parcialmente por la Universidad de Florida, el Center for Natural Resources (UF-CNR) y el South Florida Water Management District (SFWMD). El maíz dulce se cultivó con semillas donadas por Novartis.

Referencias

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO.

Biggar, J.W. y D.R. Nielsen. 1967. Miscible displacement and leaching phenomenon. *Agronomy* 12: 254-274 pp.

Blake, G.R. y K.H. Hartge. 1986. Bulk density. En: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 363-376 pp. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin.

Celia, M.A., E.T. Bouloutas y R.L. Zarba. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.* 26: 1483-1496 pp.

Danielson, R.E. y P.L. Sutherland. 1986. Porosity. En: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Ed. 443-462 pp. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin.

Fish, J.E. y M. Stewart. 1991. Hydrogeology of the surficial aquifer system, Dade County, Florida. *Water Resources Investigations Report no. 90-4108*. U.S. Geological Survey: Tallahassee (FL).

Hochmuth G.J. 2000. Nitrogen Management Practices for Vegetable Production in Florida. Circular 1222, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu/CV237> (last accessed July 25, 2005).

Hollenbeck, K.J., J. Simunek y M.Th. van Genuchten. 2000. RETCML: Incorporating maximum likelihood estimation principles in the RETC soil hydraulic parameter estimation code. *Comput. Geosci.* 26: 319-327 pp.

Huyer, W. y A. Neumaier. 1999. Global optimization by multilevel coordinate search. *J. Global Optimization* 14, 331-355 pp.

Knisel, W.G. y F.M. Davis. 1999. GLEAMS version 3.0 User Manual. Report SEWRL-WGK/FMD-050199. USDA-ARS-SEWRL: Tifton (GA).

Kool, J.B. y J.C. Parker, 1988. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. *Water Resour. Res.* 24: 817-830 pp.

Li, Y.C. 1999. Sun Hemp – A new cover crop for South Florida. *Vegetarian* 99: 1-2 pp.

Li, Y.C., H.H. Bryan, W. Klassen, M. Lamberts y T. Olczyk. 2002. Sweet Corn Production in Miami-Dade County, Florida. Fact Sheet HS-862, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu/TR013> (last accessed July 25, 2005).

Miller W.P. y D.M. Miller. 1987. A micro-pipette method for soil mechanical analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18:1-15 pp.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522 pp.

Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290 pp.

Nelder, J. A. y R. Mead. 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal* 7: 308-313 pp.

Rao, R.B. y Y.C. Li. 2003. Nitrogen mineralization of cover crop residues in calcareous gravelly soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34: 299-313 pp.

Ritter, A., R. Muñoz-Carpena, C.M. Regalado, M. Vanclouster y S. Lambot. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *J. Hydrol.* 295: 124-139 pp.

Shinde D., M.R. Savabi, P. Nkedi-Kizza y A. Vazquez. 2001. Modeling transport of atrazine through calcareous soils from South Florida. *Transactions of the ASAE* 44: 251-258 pp.

Smajstrala, A.G. 2000. Irrigation management. Fl. Coop. Extension service, IFAS-University of Florida. EDIS Doc. no. AE260. <http://edis.ifas.ufl.edu> (last accessed June 25, 2002).

USDA-NRCS, 2004. Classification of the Soils (SS of Dade, Florida). USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. http://soils.usda.gov/survey/online_surveys/florida/dade (last accessed March 14, 2004).

Valenzuela, H. y R.L. Fox. 2005. Sweet corn (*Zea mays* L. convar. saccharata Koern.) under tropical/subtropical conditions. En: *World Fertilizer Use Manual*. International Fertilizer Industry Association (IFA). <http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/html/pubman/sweetcor.htm> (last accessed July 25, 2005).

van Dam, J.C., J.N.M. Stricker y A. Verhoef. 1992. Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1042-1050 pp.

van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898 pp.

Vanclouster M., P. Viaene, J. Diels y K. Christiaens. 1996. WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual (release 2.0), Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Warrick, A.W. y D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hillel, D. (ed.), *Applications of Soil Physics*. pp. 319-344. New York: Academic Press.

Wösten, J.H.M., C.H.J.E. Schuren, J. Bouma y A. Stein. 1990. Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 832-836 pp.