

INTERPRETACIÓN DEL CAMBIO DEL FLUJO Y LIXIVIACIÓN EN EL SUELO ASOCIADO AL USO DE UN CULTIVO DE CUBIERTA ESTIVAL UTILIZANDO TÉCNICAS DE ANÁLISIS GLOBAL DE INCERTIDUMBRE

Axel Ritter^{1*}, Rafael Muñoz-Carpena², David D. Bosch³, Bruce Schaffer⁴ y Thomas L. Potter³

1: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)
Dep. Suelos y Riegos
Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife
e-mail: aritter@icia.es, web: <http://www.icia.es/gh>

2: Agricultural and Biological Engineering Dept.
University of Florida.
101 Frazier Rogers Hall, PO Box 110570 Gainesville, FL 32611 (EEUU)

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

4: Tropical Research and Education Center (TREC)
University of Florida
18905 SW 280 St, Homestead, FL 33031 (EEUU)

Palabras clave: Aguas subterráneas, contaminación difusa, probabilidad de excedencia, sensibilidad, simulación de procesos hidrológicos.

RESUMEN. *La incorporación de incertidumbre en modelos deterministas proporciona información útil sobre el rango probable de las variables simuladas y por lo tanto una mayor base para la toma de decisiones. En este trabajo combinamos técnicas globales de análisis de sensibilidad e incertidumbre con el modelo numérico WAVE para la simulación de los balances de agua y nitrógeno (N) en la zona no saturada del suelo. El objetivo consiste en evaluar el impacto del maíz dulce de invierno (Zea mays L.) en la calidad del agua subterránea, así como en determinar la efectividad del uso de un cultivo de cubierta leguminoso estival para reducir dicho impacto, bajo las condiciones subtropicales del sur de Florida. Las simulaciones se realizaron para una finca de 4 ha en la que se establecieron seis parcelas donde se recogieron datos sobre variables hidrológicas y del ciclo del nitrógeno. Durante la época estival se plantó crotalaria (Crotalaria juncea L.) como cultivo de cubierta en tres de las parcelas, mientras que las otras tres se dejaron en barbecho. Aunque, desde un punto de vista determinista las diferencias observadas en los distintos escenarios simulados no son estadísticamente significativas, mediante las técnicas de análisis global de incertidumbre se obtienen funciones de probabilidad de las predicciones del modelo numérico que permiten llegar a las siguientes conclusiones al final del periodo de estudio. Con el uso del cultivo de cubierta la probabilidad de que el 60% de las entradas de agua a la zona no saturada se pierdan como percolación es del 35% frente a una probabilidad del 46% cuando no se utiliza cultivo de cubierta. En ambos casos, las concentraciones de N lixiviado superaron, con una probabilidad >80%, los 52 kg ha⁻¹ (que representan aproximadamente el 20% de la fertilización nitrogenada). Las concentraciones de N lixiviado superaron, con una probabilidad >70%, el límite regulatorio de 11 mg L⁻¹. Sin embargo, el uso del cultivo de cubierta está asociado a una mayor probabilidad de lixiviar N. Esto se explica por un aumento del contenido de N del suelo como resultado de que el uso del cultivo de cubierta leguminoso no se acompañó con una reducción en la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz.*

ABSTRACT. *Incorporation of uncertainty in the predictions of deterministic models provides useful information about the probable range of the simulated variables and therefore a higher base for decision*

making. In this paper, we combine global techniques for sensitivity and uncertainty with the WAVE model, designed for the numerical simulation of water and nitrogen balances in the unsaturated zone of soil. The objective was to assess the impact of winter sweet corn (*Zea mays* L.) on groundwater quality and to determine the effectiveness of the use of a leguminous summer cover crop to reduce this impact under the subtropical conditions of southern Florida. The simulations were conducted for a 4 ha field with six plots, where data of hydrological variables and nitrogen cycle components were collected. During the summer, the cover crop (*Crotalaria juncea* L.) was planted in three of the plots, while the other three were kept fallow. Although from a deterministic point of view the differences observed in the simulated scenarios are not statistically significant, using the global uncertainty analysis provides probability density functions for the simulated variables that were useful to come to the following conclusions. Using the cover crop, 60% of total incoming water was lost as drainage with 35% probability, compared to 46% probability when the cover crop was not used. Nitrogen (N) leaching exceeded 52 kg ha^{-1} (about 20% of the N fertilizer applications) with a probability of 80% in both cases. In addition, N leachate concentrations exceeded the regulatory limit of 11 mg L^{-1} with probabilities > 70%. However, the use of the cover crop is associated with larger probability of leaching N. This is due to the increased in N content in the soil, as a consequence of using the leguminous cover crop without a reduction in N fertilization of the winter crop.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de maíz dulce (*Zea mays* L.) en el Sur de Florida (EEUU) constituye una actividad económica importante, especialmente en el Condado de Miami-Dade (Li et al., 2002). Sin embargo, esta zona agrícola al sur del condado ocupa un área ecológicamente sensible situada entre los Parques Nacionales de Biscayne y Los Everglades, de manera que la agricultura en esta zona ha sido considerada como una amenaza para los frágiles ecosistemas naturales de estos parques nacionales, ya que representa una competencia por la tierra y los recursos hídricos. Por otro lado, las características hidrológicas de la región favorecen los flujos rápidos en la zona no saturada y saturada (Fisch y Stewart, 1991; Truss et al., 2007), lo cual, junto a las elevadas tasas de productos agroquímicos utilizados por los agricultores, 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. Éste acuífero proporciona agua potable para la mayoría de la población que reside en el sudeste de Florida. 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.

En concreto, después de la cosecha del cultivo del maíz, los altos niveles de nutrientes que pueden permanecer en el suelo pueden originar lixiviados hacia las aguas subterráneas. Para ayudar a prevenir la lixiviación del nitrógeno, se aconseja a los productores mantener un cultivo de cubierta como alternativa al barbecho. La crotalaria (*Crotalaria juncea* L.) 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. A medida que esta planta crece, incorpora a sus tejidos el nitrógeno acumulado en el suelo, con lo que se limita el riesgo de generación de lixiviados hacia las aguas subterráneas. Luego, antes del comienzo de la siguiente época de cultivo del maíz, los residuos vegetales de este cultivo de cubierta son incorporados al suelo (Wang et al., 2002).

Recientemente, Muñoz-Carpena et al. (2008) abordaron la evaluación de la eficacia de este tipo de práctica agrícola, es decir, del efecto del cultivo de maíz en combinación con la crotalaria como cultivo de cubierta de verano, para reducir la lixiviación del N en el sur del condado de Miami-Dade. Para ello utilizaron una combinación de datos de campo y los resultados obtenidos con un modelo de simulación determinista como herramienta para interpretar el flujo de agua y la transformación del N en el suelo. Con este estudio concluyeron que el uso de la crotalaria como cultivo de cubierta mejora las condiciones físicas del suelo (aumento de la retención de agua) y, en consecuencia, contribuye a una mayor evapotranspiración real y a la disminución de la percolación. Con base en los resultados de la simulación del N, llegaron a la conclusión de que con el uso del cultivo de cubierta, se produce tal aumento del contenido de N en el suelo, que aunque la absorción de N por el maíz y las producciones se incrementaron ligeramente, también lo hizo la lixiviación de N hacia el acuífero.

Teniendo en cuenta el grado de incertidumbre asociado a casi todos los modelos de predicción determinista y a los datos medidos (Shirmohammadi et al., 2006), desde el punto de vista de la toma de decisiones dirigidas a

mejorar la gestión ambiental, sería aconsejable la integración explícita de la incertidumbre en los resultados obtenidos por Muñoz-Carpena et al. (2008). De hecho, según Beven (2006), si la incertidumbre de un modelo de simulación no se toma en consideración, la ciencia y la utilidad del modelo quedan debilitados. En general, los complejos modelos hidrológicos y de calidad de aguas contienen un número alto de factores que tienen influencia sobre la variabilidad de los resultados de la simulación, por lo que son considerados como fuentes de incertidumbre (Beven, 1989; Haan, 1989; Luis y McLaughlin, 1992). Para dar cuenta de la incertidumbre en estos modelos se recomienda la obtención de funciones de densidad de probabilidad (PDF) para las variables de interés simuladas (Haan, 1989; Shirmohammadi et al., 2006; Muñoz-Carpena et al., 2007). A partir de éstas PDFs es posible evaluar la incertidumbre en las predicciones del modelo, estableciendo niveles de confianza, como por ejemplo, con la probabilidad de excedencia de un valor umbral prefijado (Morgan y Henrion, 1992).

Saltelli et al. (2004, 2005) propusieron un conjunto de técnicas modernas de análisis global para realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre con cualquier modelo numérico. El análisis de sensibilidad permite determinar la influencia relativa de un parámetro del modelo sobre una variable de interés simulada. Por tanto, resulta útil para identificar de manera eficiente el subconjunto de los principales parámetros que controlan la respuesta del modelo. Por otro lado, el papel del análisis de incertidumbre es el de propagar, sobre las predicciones que realiza el modelo, la variabilidad que es consecuencia de los datos de entrada, de los algoritmos del modelo, de los cambios de escala, etc. Básicamente, se trata de realizar un número importante de simulaciones con diferentes conjuntos de parámetros y de construir la PDF de cada variable de interés a partir de las correspondientes predicciones.

El objetivo de este trabajo es el de utilizar las técnicas de análisis global propuestas por Saltelli et al. (2004) para determinar la incertidumbre asociada a las predicciones del modelo numérico WAVE (Vanclouster et al., 1996) utilizado como herramienta para simular los flujos de agua y el transporte de N a través del perfil del suelo hacia el acuífero. Aplicando este procedimiento al escenario estudiado por Muñoz-Carpena et al. (2008), buscamos evaluar la eficacia del uso de la crotalaria como cultivo de cubierta de verano para reducir la lixiviación del N generada con el cultivo de maíz de invierno.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Parcelas de ensayo

El estudio descrito en Muñoz-Carpena et al. (2008) se realizó en una finca de 4 ha situada en el Tropical Research and Education Center 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. Dentro de la finca se establecieron seis parcelas experimentales (47 x 27 m cada una) en las que, durante un periodo de cuatro años, se ha cultivado maíz dulce en los meses de invierno (noviembre a marzo). Cada año después de la cosecha (enero-marzo), en tres de las parcelas seleccionadas aleatoriamente (parcelas CCC) se utilizó *Crotalaria juncea* L. durante el verano como cultivo de cubierta (Fig. 1). Las otras quedaron en barbecho durante la época estival (parcelas SCC).

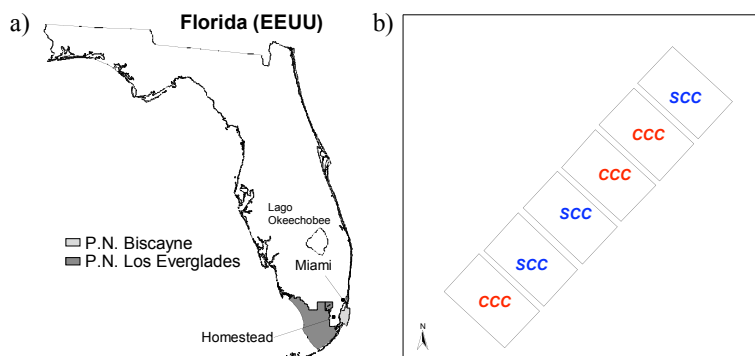


Figura 1. Distribución de las parcelas según tratamiento (sin y con cultivo de cubierta: SCC, CCC).

Este trabajo se centra solamente en las dos últimas campañas de cultivo que denominaremos Periodo 1 y Periodo 2, respectivamente. Los detalles sobre el tipo de suelo y sus propiedades físicas, las fechas de plantación y gestión del cultivo, así como la obtención de datos de entrada para el modelo de simulación se describen en Ritter et al. (2005) y Muñoz-Carpena et al. (2008). Cabe señalar que la cantidad total de N aplicado en estas campañas fue de 224.2 y 260.9 kg ha⁻¹, respectivamente.

2.2. Modelo numérico WAVE

El modelo numérico utilizado para la simulación del flujo y transporte de N en la zona no saturada es el modelo mecánico-determinístico WAVE (Vanclouster et al., 1996) que permite describir el transporte vertical de agua, solutos no reactivos, formas de nitrógeno y pesticidas en el suelo y en la planta. Se trata de una alternativa a otros modelos numéricos porque puede simular el flujo y el transporte de N sin necesidad de modelar el crecimiento del cultivo, lo cual es útil cuando no se dispone de información sobre los parámetros fenológicos y de desarrollo de la planta. Los detalles sobre los algoritmos y los parámetros que utiliza WAVE y que son relevantes para este estudio se describen en Muñoz-Carpena et al. (2008).

2.3.- Análisis global de sensibilidad e incertidumbre

El procedimiento de análisis global realizado en este trabajo consiste en dos fases. En primer lugar se ha realizado un análisis de sensibilidad global que permite evaluar el efecto de cada parámetro sobre la respuesta del modelo pero explorando los intervalos de variación posible de todos los parámetros de forma simultánea. Al contrario que las técnicas convencionales basadas en la derivada arbitraria de la salida del modelo sobre la variación de los parámetros “uno-a-uno” sobre un intervalo cualquiera, las técnicas globales son aplicables a todos los modelos sin restricción, incluyendo modelos no lineales (Saltelli et al., 2005), como son generalmente los modelos hidrológicos. Entre las diversas técnicas estadísticas disponibles (Saltelli et al., 2005), hemos utilizado el método propuesto por Morris (1991) y posteriormente modificado por Campolongo et al. (2007), porque permite estudiar la sensibilidad del modelo frente a un gran número de parámetros a un coste computacional relativamente pequeño. Además, la interpretación de sus resultados es sencilla y proporciona una clasificación cualitativa de los parámetros con mayor influencia en las variables simuladas. Una vez identificado, con el método de Morris, el subconjunto de parámetros de entrada más relevante, se aborda el análisis de incertidumbre tipo Monte Carlo llevando a cabo un número alto de simulaciones generado mediante muestreo por Hipercubo Latino (McKay, 1995) sobre el espacio paramétrico correspondiente al subconjunto de parámetros mencionado, es decir, aquellos seleccionados según su importancia. Con las predicciones del modelo para todas las simulaciones realizadas (que se derivan de un procedimiento de muestreo aleatorio) se construyen las funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de probabilidad acumulada (CDF) para cada variable de interés. Con estas funciones, cuantificamos la incertidumbre asociada a estas variables mediante el intervalo para un 95% de confianza (es decir, la gama de valores que se encuentran entre los percentiles 2,5% y 97,5% de la distribución acumulada). Tras identificar todos los parámetros del modelo WAVE necesarios para simular el movimiento de agua y el transporte de N en las parcelas de estudio (32 parámetros que se incluyen en la Tabla 1), se establece que el número de simulaciones a llevar a cabo para el realizar el método modificado de Morris puede ser calculado como $N=10 \cdot (32+1) = 330$. Posteriormente, una vez seleccionado el subconjunto de los k parámetros más importantes, se determina el número de evaluaciones previstas para el análisis de incertidumbre como $N=500 \cdot (k+2)$.

El procedimiento descrito se llevó a cabo con la ayuda del programa informático SimLab v2.2 (Saltelli et al., 2004). Con base en las PDFs de los 32 parámetros de entrada de WAVE que se incluyen en la Tabla 1, SimLab genera una matriz de 330 por 32 valores pseudoaleatorios para ejecutar el modelo y realizar el análisis de Morris. Se prepararon archivos de proceso por lotes para llevar a cabo todas las simulaciones con WAVE de forma automática y con los resultados se procedió al análisis de Morris con SimLab para cada variable de interés. A continuación, para el análisis de incertidumbre tipo Monte Carlo, se generó con SimLab otra matriz de valores pseudoaleatorios del subconjunto de los k parámetros más relevantes para llevar a cabo $N=500 \cdot (k+2)$ simulaciones, con cuyos resultados se construyeron las PDFs y CDFs de las variables de interés. De acuerdo con Muñoz-Carpena et al. (2008), las siguientes variables acumuladas fueron seleccionadas aquí: la percolación, D

(mm); la absorción radicular de N por el cultivo de maíz, $NUPTK$ (kg ha^{-1}), la lixiviación de N, $NLCH$ (kg ha^{-1}); y el promedio de concentración de N lixiviado, $NLCH/D$ (mg l^{-1}). Se tuvieron en cuenta también la evapotranspiración real, ET_a (mm) y la variación en el contenido de agua de la zona no saturada (mm). Todas estas variables se consideraron para cada uno de los cuatro escenarios simulados: parcelas SCC y CCC para los Periodos 1 y 2 (SCC01, CCC01, SCC02, CCC02).

2.4.- Parametrización del modelo y selección de PDFs

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 y el espesor restante (0.2-0.9 m) es la roca caliza. La condición de contorno para el límite inferior del perfil se fijó como percolación libre. Con base en las observaciones en campo, las raíces colonizan el suelo y pueden llegar a extenderse algunos centímetros en la capa de roca caliza, por lo que la profundidad máxima de raíces se fijó en 0.30 m. La utilización del modelo WAVE para simular el flujo y transporte del N implica la estimación de un gran número de parámetros (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros del modelo WAVE y su correspondiente función de probabilidad (PDF) elegida.

Descripción	Proceso	PDF	Valor de referencia ^a	Intervalo de variación
Índice de superficie foliar, LAI (-)	Transpiración potencial	Beta	(0 - 2.9) ^b	
Coefficiente de cultivo, K_c (-)	Evapotranspiración potencial	Beta	(0.6 - 1.1) ^b	
Contenido de humedad a saturación, θ_s (m^3m^{-3})	Curva retención de humedad			
Roca caliza (Periodos 1 y 2)		Normal	0.406 ± 0.207	[0.38 - 0.432]
SCC y CCC (Periodos 1 y 2)		Uniforme	0.467	[0.46 - 0.47]
Contenido de humedad residual, θ_r (m^3m^{-3})	Curva retención de humedad	Normal	0.092 ± 0.027	[0.039 - 0.145]
Inversa de la presión de burbujeo, α (cm^{-1})	Curva retención de humedad			
Roca caliza (Periodos 1 y 2)		Normal	0.117 ± 0.272	[0.082 - 0.152]
SCC (Periodos 1 y 2)		Normal	0.093 ± 0.138	[0.075 - 0.111]
CCC (Periodo 1)		Normal	0.075 ± 0.090	[0.06 - 0.09]
CCC (Periodo 2)		Normal	0.204 ± 0.181	[0.180 - 0.228]
Parámetro de forma (pendiente), n (-)	Curva retención de humedad			
Roca caliza (Periodos 1 y 2)		Normal	1.116 ± 0.142	[1.098 - 1.134]
SCC (Periodos 1 y 2)		Normal	1.220 ± 0.118	[1.205 - 1.235]
CCC (Periodo 1)		Normal	1.132 ± 0.039	[1.125 - 1.139]
CCC (Periodo 2)		Normal	1.087 ± 0.014	[1.085 - 1.089]
Conductividad hidráulica saturada, K_s (m día^{-1})	Cond. hidráulica insaturada			
Roca caliza (Periodos 1 y 2)		Lognormal	8978 ± 2836	[6142 - 11815]
SCC (Periodos 1 y 2)		Lognormal	516 ± 198	[319 - 714]
CCC (Periodo 1)		Lognormal	1545 ± 766	[779 - 2310]
CCC (Periodo 2)		Lognormal	1054 ± 175	[879 - 1229]
Conectividad de poro, λ^* (-)	Cond. hidráulica insaturada	Triangular	0.5	[0 - 2.0]
Intensidad máx. de absorción de agua, S_{max} (día^{-1})	Absorción radicular de agua	Triangular	0.012	[0.003 - 0.03]
Densidad aparente, ρ_b (T m^{-3})	Adsorción de NH_4^+	Uniforme	1.412	[1.406 - 1.422]
Dispersividad hidrodinámica, λ (cm)	Transporte de solutos	Lognormal	3.43 ± 3.96	[0.37 - 13.64]
Coefficiente de distribución de NH_4^+ , K_d (m^3T^{-1})	Adsorción de NH_4^+	Triangular	0.78	[0.1 - 2.0]
Absorción máxima de N, N_{max} (kg ha^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	208	[160.0 - 224.2]
Intensidad de nitrificación, k_{nitr} (día^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	0.190	[0.1 - 0.8]
Intensidad de desnitrificación, k_{denit} (día^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	0.036	[0.001 - 0.1]
Intensidad descomposición estiércol, k_{man} (día^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	0.011	[0.001 - 0.035]
Intensidad descomposición residuos veget., k_{veg} (día^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	0.0099	[0.001 - 0.040]
Intensidad descomposición de humus, k_{hum} (día^{-1})	Balance de nitrógeno	Triangular	0.00011	[10^{-5} - $5.2 \cdot 10^{-4}$]
Eficiencia de transformación de carbono, f_e (-)	Balance de nitrógeno	Beta	0.425 ± 0.170	[0.05 - 0.80]
Fracción de humificación, f_h (-)	Balance de nitrógeno	Beta	0.277 ± 0.099	[0.08 - 0.43]
Relación C/N, r_o (-)	Balance de nitrógeno			
SCC (Periodos 1 y 2)		Uniforme	18.4 ± 2.4	[15.7 - 22.0]
CCC (Periodos 1 y 2)		Triangular	16.3 ± 1.1	[14.0 - 18.0]

^a Valor promedio (\pm desviación estándar). ^b Se ha considerado un coeficiente de variación de 16% para la series de LAI y de 30% para la series de K_c .

Como parámetros hidráulicos base para el análisis se tomaron los valores obtenidos mediante simulación inversa por Muñoz-Carpena et al. (2008). Éstos fueron optimizados para el suelo y la roca caliza. Para poder

detectar posibles cambios en la retención del agua como consecuencia del uso del cultivo de cubierta, los parámetros hidráulicos del suelo en las parcelas CCC fueron optimizados por separado para el Periodo 1 (2001-2002) y el Periodo 2 (2002-2003). El resto de parámetros se midieron o fueron obtenidos de la literatura científica según se describe en Muñoz-Carpena et al. (2008). Para llevar a cabo los análisis globales de sensibilidad e incertidumbre, a los parámetros de la Tabla 1 se les asignaron valores promedio, intervalos de variación y PDF con base en información recogida de diferentes referencias bibliográficas y los criterios usados por Muñoz-Carpena et al. (2007) para la selección del tipo de PDF.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Análisis global de sensibilidad

El método propuesto por Morris (1991) proporciona dos medidas de sensibilidad para cada parámetro: i) el promedio de los efectos elementales (μ), que estima el efecto global de los parámetros seleccionados en una determinada variable simulada por el modelo y ii) la desviación estándar de los efectos (σ), que representa otros efectos del parámetro de orden superior tales como las interacciones entre ellos. Para evitar la posible cancelación de los efectos de signo contrario, Campolongo et al. (2007) propone utilizar los valores absolutos de los efectos elementales (μ^*) en lugar de μ . Representando gráficamente μ^* frente a σ , se seleccionaron como parámetros importantes aquellos que se encuentran más alejados del origen. De acuerdo con estos resultados (no mostrados), el número de parámetros identificados como importantes se redujo de 32 a 24, donde cabe destacar que K_c y S_{max} y tienen una fuerte influencia en la simulación de la percolación (D). Estos dos parámetros junto con K_d y k_{nitri} son los que principalmente afectan a la lixiviación de N ($NLCH$). La absorción de N por el cultivo de maíz ($NUPTK$) está controlada principalmente por N_{max} y en menor grado por k_{lit} . Los parámetros que más afectan al promedio de concentración de N lixiviado ($NLCH/D$) son k_{nitri} y K_d . En todos los casos y para la mayoría de los parámetros, σ es considerablemente menor que μ^* lo que indica que la sensibilidad como consecuencia de interacciones entre parámetros es pequeña y por tanto, son los efectos directos del parámetro de entrada los que condicionan la variabilidad en las predicciones sobre las salidas del modelo. Para el subconjunto de esos 24 parámetros se genera una matriz de valores pseudoaleatorios para realizar $N=500(24+2)=13000$ simulaciones, con cuyos resultados se construyen las PDFs de las variables de interés. Los ocho parámetros descartados fueron θ_s (CCC y SCC), α (CCC01), n (CCC01), n (CCC02), K_s (CCC01), ρ_b , k_{denit} y f_h .

3.2.- Análisis global de incertidumbre sobre las predicciones del balance de agua y de nitrógeno

Componentes del balance hidrológico

Para ilustrar gráficamente la incertidumbre asociada a las predicciones obtenidas de las variables de interés seleccionadas, se construyeron las PDFs/CDFs (a partir de los resultados de las 13000 simulaciones realizadas). Las estadísticas de análisis de incertidumbre de estas variables se presentan en la Tabla 2. De forma similar a los resultados obtenidos por Muñoz-Carpena et al. (2008), los valores más frecuentes en las PDFs (la moda en la Tabla 2) indican que la utilización del cultivo de cubierta produjo pequeñas reducciones en la percolación (D). Con respecto a las entradas de agua totales (671 mm para el Periodo 1 ó 695 mm para el Periodo 2), la probabilidad de que haya percolado más del 60% de la lluvia + riego, es de >98% para el Periodo 1 independiente del uso de cultivo de cubierta o no. Durante el Periodo 2, esta probabilidad queda reducida al 46% y 35% en las parcelas SCC y CCC, respectivamente (Fig. 2a). En la Tabla 2 se incluyen también las predicciones que realiza el modelo WAVE sobre la evapotranspiración real del maíz (ET_a) y el cambio en el contenido de agua del suelo. Con respecto a ET_a , ésta fue mayor en las parcelas CCC que en las SCC (8% para el Periodo 1, y 5% para el Periodo 2). Esto sugiere que después de cuatro años de rotación continua con el cultivo de cubierta, éste ha introducido cambios observables en el suelo que mejoran su retención de agua. Este efecto se manifiesta con mayor intensidad cuanto más limitante es el contenido de humedad de suelo para satisfacer la demanda hídrica del cultivo. Durante el Periodo 2, las condiciones limitantes de humedad de suelo fueron inferiores al haber sido las entradas totales de agua mayores (695 mm frente a 671 mm). El contenido de humedad al final de esta última campaña incrementó con respecto a la campaña anterior en un 84 y 112% para los tratamientos SCC y CCC, respectivamente. Por lo tanto, el cultivo de cubierta leguminoso produjo 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. Por último, cabe señalar que la percolación total, que alcanza el 60% de toda el agua de entrada en el suelo, puede ser consecuencia de un exceso de riego como un posible defecto recurrente en la gestión del agua en esta zona, en parte justificada por la capacidad de retención de agua relativamente baja de estos suelos y por su alta permeabilidad.

Tabla 2. Estadísticas del análisis de incertidumbre para de las PDFs de las salidas del modelo.

Variable de interés	Periodo 1			Periodo 2		
	SCC	CCC	% $\Delta_{SCC,CCC}$	SCC	CCC	% $\Delta_{SCC,CCC}$
Percolación, D (mm)	493 [414 - 535]	461 [403 - 521]	-7%	417 [334 - 485]	408 [331 - 469]	-2%
Evapotranspiración actual, ET_a (mm)	272 [194 - 324]	286 [231 - 354]	8%	286 [217 - 367]	302 [218 - 349]	5%
Variación en el contenido de humedad (mm)	-62 [-79 - -47]	-83 [-100 - -69]	25%	-10 [-34 - 18]	10 [-14 - 35]	200%
Absorción de N, $NUPTK$ (kg ha ⁻¹)	163 [134 - 202]	194 [151 - 224]	16%	199 [154 - 226]	208 [157 - 235]	4%
Lixiviación de N, $NLCH$ (kg ha ⁻¹)	51 [35 - 107]	52 [33 - 122]	2%	58 [41 - 134]	78 [47 - 158]	26%
Promedio [N] lixiviado, $NLCH/D$ (mg L ⁻¹)	11 [8 - 22]	11 [7 - 26]	0%	17 [11 - 31]	23 [12 - 37]	26%

Los periodos de simulación fueron desde 25 noviembre de 2001 hasta 31 marzo de 2002 (Periodo 1) y desde 1 de diciembre de 2002 hasta 31 marzo 2003 (Periodo 2). Se indica la moda (valor más frecuente) y el intervalo de confianza para el 95%, representado por la franja de valores comprendida entre los percentiles 2.5% y 97.5% de la CDF. % $\Delta_{SCC,CCC}$ indica las diferencias (%) en la moda de las parcelas CCC con respecto de las SCC.

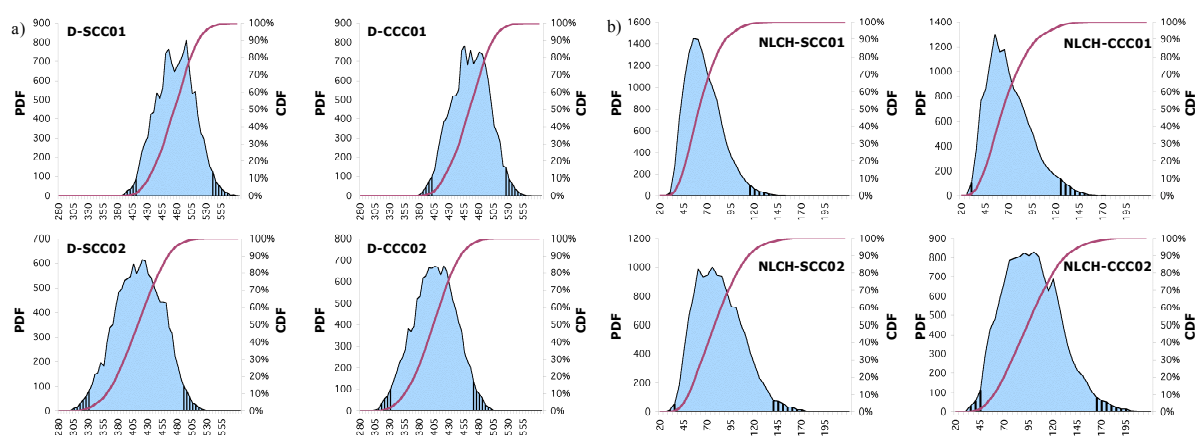


Figura 2. Incertidumbre global generada con 13000 simulaciones, para la predicción de percolación, D (mm) y nitrógeno lixiviado, $NLCH$ (kg ha⁻¹) en las parcelas CCC y SCC para ambos periodos: (SCC01, CCC01, SCC02, y CCC02). El eje vertical izquierdo indica las unidades de la PDF y el derecho las de la CDF. El área no rayada representa la región de confianza para un 95%.

Balace de nitrógeno y su lixiviación

En la Tabla 2 se han incluido también las estadísticas del análisis de incertidumbre correspondientes a algunas de las componentes del balance de N simuladas por el modelo WAVE. La lixiviación del N como consecuencia del cultivo de maíz de invierno depende de varios factores como son la cantidad de fertilizantes inorgánicos y orgánicos utilizados, el contenido de N orgánico del suelo, la absorción de N por las raíces, las transformaciones de las diferentes especies de N en el suelo en nitrato. La absorción de N por la planta fue mayor en las parcelas CCC que en las SCC durante ambos periodos (Tabla 2), aunque esta diferencia es más grande durante el Periodo 1 que en el Periodo 2 (16% frente a 4%). A partir de las PDFs se deduce también que la probabilidad de que la absorción sea ≥ 155 kg ha⁻¹ es del 75%, 96%, 97% y 98% para cada uno de los escenarios simulados (SCC01, CCC01, SCC02, CCC02), respectivamente. Las estimaciones de lixiviación de N ($NLCH$) muestran diferencias entre ambos tratamientos siendo éstas superiores en el Periodo 2 (26% frente a 2%) (Tabla 2). Las correspondientes PDFs (Fig. 2b) muestran un sesgo positivo y, para el Periodo 1, se observa un gran solape en

las PDFs de las parcelas SCC y CCC. Se desprende que, con un 70% de probabilidad, la cantidad anual de N lixiviado es $\geq 52 \text{ kg ha}^{-1}$ (en torno al 20% del N aplicado). Sin embargo, en el Periodo 2, las PDFs de las parcelas SCC y CCC son diferentes, de tal forma que la probabilidad de superar lixiviados $NLCH = 52 \text{ kg ha}^{-1}$ es del 87% y 95% para SCC y CCC, respectivamente. Expresando los lixiviados de N por unidad de flujo que percola ($NLCH/D$), los valores son $>11 \text{ mg L}^{-1}$ en todos los casos (Tabla 2), aunque su probabilidad de excedencia está alrededor de 70% para el Periodo 1 y es superior al 97% para el Periodo 2. Las diferencias entre parcelas SCC y CCC sólo se observan para el Periodo 2 (17 mg L^{-1} frente a 23 mg L^{-1}) lo que supone una variación del 26%.

4. CONCLUSIONES

Los análisis de sensibilidad e incertidumbre realizados con técnicas estadísticas globales aplicados a la simulación de los balances de agua y nitrógeno en la zona no saturada del suelo fueron útiles para evaluar 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 en la reducción de dicho impacto, bajo las condiciones subtropicales del sur de Florida. Con el uso del cultivo de cubierta la probabilidad de que el 60% de las entradas de agua a la zona no saturada se pierda por percolación es del 35% frente a una probabilidad del 46% cuando no se utiliza cultivo de cubierta. Sin embargo, el uso del cultivo de cubierta incrementa la probabilidad de superar lixiviados de N de 52 kg ha^{-1} (87% frente a 95%). Con respecto a la concentración del lixiviado se observó que la probabilidad de exceder el límite regulatorio de 11 mg L^{-1} aumento desde aproximadamente 70% de los casos en el Periodo 1 hasta $>97\%$ de los casos en el Periodo 2 debido a diferencias en el balance de agua entre los dos años. Al final del periodo estudiado se puede concluir que el uso del cultivo de cubierta contribuyó a la reducción del flujo hacia el acuífero. Sin embargo, también produjo un aumento de lixiviación de N, como consecuencia del aumento del contenido de N del suelo por el efecto del cultivo de cubierta y por no haber reducido la fertilización nitrogenada durante el cultivo de maíz de invierno.

Agradecimientos: Los autores agradecen a M. Gutiérrez, M. Hubbard y T.T. Dispenza (TREC) su colaboración en los trabajos de campo. Este estudio ha sido financiado por la Universidad de Florida, el Center for Natural Resources y el South Florida Water Management District. El maíz dulce se cultivó con semillas donadas por Novartis. A. Ritter agradece la cofinanciación del Fondo Social Europeo.

REFERENCIAS

- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology – The case of physically based models. *J. Hydrol.* 105, 157-172.
- Beven, K., 2006. On undermining the science? *Hydrol. Process.* 20, 1-6.
- Campolongo, F., J. Cariboni, A. Saltelli, 2007. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software* 22, 1509-1518.
- 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, Florida (EEUU).
- Haan, C.T., 1989. Parametric uncertainty in hydrologic modeling. *Transactions of ASAE* 32, 132-146.
- Knisel, W.G. y F.M. Davis, 1999. *GLEAMS version 3.0 User Manual*. Report SEWRL-WGK/FMD-050199. USDA-ARS-SEWRL: Tifton, Georgia (EEUU).
- Li, Y.C., 1999. Sun Hemp – A new cover crop for South Florida. *Vegetarian* 99, 1-2.
- 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> (último acceso abril, 2009).
- Luis, S.J. y D. McLaughlin, 1992. A stochastic approach to model validation. *Adv. Water Resour.* 15, 15-32.
- McKay, M.D. 1995. Evaluating prediction uncertainty. *NUREG/CR-6311*. U.S. Nuclear Regulatory Commission and Los Alamos National Laboratory.
- Morgan, M.G. y M. Henrion, 1992. *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Morris, M.D., 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometric* 33, 161-174.
- Muñoz-Carpena, R., Z. Zajac y Y.-M. Kuo, 2007. Evaluation of water quality models through global sensitivity and uncertainty analyses techniques: application to the vegetative filter strip model VFSDMOD-W. *Transactions of ASABE* 50, 1719-1732.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, D.D. Bosch, B. Schaffer y T.L. Potter, 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. *Agric. Water Manage* 95, 633-644.
- Saltelli, A., S. Tarantola, F. Campolongo y M. Ratto, 2004. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Saltelli, A., M. Ratto, S. Tarantola y F. Campolongo, 2005. Sensitivity analysis for chemical models. *Chem Rev.* 105, 2811-2827.
- Shirmohammadi, A., I. Chaubey, R. D. Harmel, D.D. Bosch, R. Muñoz-Carpena, C. Dharmasri, A. Sexton, M. Arabi, M. L. Wolfe, J. Frankenberger, C. Graff y T. M. Sohrabi, 2006. Uncertainty in TMDL models. *Transactions of ASABE* 49, 1033-1049.
- Truss, S., M. Grasmueck, S. Vega y D.A. Viggiano, 2007. Imaging rainfall drainage within the Miami oolitic limestone using high-resolution time-lapse GPR. *Water Resour. Res.* 43, W03405.1-W03405.15.
- Vancloster M., P. Viaene, J. Diels y K. Cristianes, 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.
- Wang, Q., H. Bryan, W. Klassen, Y.C. Li, M. Codillo y A. Abdul-Baki, 2002. Improved tomato production with summer cover crops and reduced irrigation rates. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 115, 202-207.