

Simulación con el modelo numérico WAVE del transporte de agua y nitrógeno a través de la zona no saturada en un cultivo de platanera

R. Muñoz-Carpena¹, J.E. Parsons² y S. Ducheyne³

1. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (España); carpena@icia.rcanaria.es
2. North Carolina State University (USA); john_parsons@ncsu.edu
3. Institute for Land and Water Management (Bélgica).

RESUMEN. El objeto del presente trabajo es calibrar el modelo WAVE frente a datos de transporte de agua y nitrógeno en la zona no saturada obtenidos en una parcela comercial de platanera en el norte de Tenerife. Se comprobó la capacidad del modelo para simular flujo de agua y nitratos hacia el acuífero contaminado de la zona. Se aplicó un gran esfuerzo en la medida experimental de los parámetros del modelo frente a la adopción de valores de la literatura demostrar su capacidad predictiva y fiabilidad. El modelo WAVE, desarrollado en el norte de Europa, se aplica aquí por vez primera a condiciones subtropicales y al cultivo de platanera. Las referencias sobre modelización de estos sistemas son escasas, en especial sobre contaminación en relación al cultivo. Los datos experimentales disponibles se compararon con las predicciones del modelo WAVE. Se obtuvieron buenos resultados en la parte de flujo de agua del modelo. La concentración de especies de N en el suelo de la parcela está en el rango de las predichas por el modelo, pero en general hay una falta de respuesta del modelo a los cambios de concentración observados en el campo. Esto se explica en términos de problemas en la representación de la absorción de N por parte del cultivo de platanera según el modelo.

ABSTRACT. The goal of this study was to test the WAVE model using field data obtained from a banana plot in the North of Tenerife. The ability of the model to estimate nitrate leaching rates to the highly polluted aquifer of the area was tested. An effort was made to measure model parameters at the field or from field samples rather than estimating them from literature values, and thus reduce the calibration needed. WAVE is a numerical model developed in Europe to study water and nitrogen fate through the unsaturated zone. Very little environmental modeling work has been done with bananas or other subtropical crops, specially on nutrient leaching. The available field data are discussed and compared to the WAVE model predictions. Good predictions are obtained from the water transport part of the model. Field concentration of N species in the unsaturated zone is within the range predicted by the model, but in some instances, there is a lack of model response to concentration changes observed in the field. This is explained in terms of problems in the way WAVE handles N uptake for the case of bananas.

1.- Introducción.

El objetivo del presente trabajo es doble. En primer lugar aplicar el modelo WAVE en un escenario agrícola no tradicional como es la producción de plátano en un sistema hortícola subtropical intensivo bajo riego. Sólo se conoce una referencia previa de la aplicación de un modelo de calidad de agua y suelo aplicado al cultivo de platanera (Parsons y Muñoz-Carpena, 1999). En segundo lugar se pretendió evaluar la capacidad que un modelo numérico complejo (WAVE), con poca o ninguna calibración, tiene para simular el transporte de agua y nitrógeno a través de la zona no saturada del suelo si se determinan experimentalmente in-situ el mayor número de parámetros posibles. La idea detrás de este planteamiento es comprobar si tal modelo, caro en términos de parámetros de entrada, puede predecir con suficiente aproximación valores de campo cuando se invierte en la medida de los parámetros experimentales que rigen el modelo (frente a valores de la literatura).

La producción de plátano en el subtrópico seco es un caso extremo de agricultura intensiva. Las altas necesidades de agua (>1000 mm/año) y nutrientes (>500 kg N/ha-año) del cultivo deben ser suministradas prácticamente en su totalidad y durante todo el año debido a que la planta no sufre parón vegetativo invernal. En las Islas Canarias el riego (fertirriego) aporta casi el 100% de dichas necesidades debido a la escasa y errática precipitación y falta de abono orgánico. En una experiencia previa (Muñoz-Carpena et al. 1997) en una parcela comercial de platanera con un sistema de riego por aspersión obsoleto de gran volumen, se encontró que la mayoría del drenaje desde el suelo hacia el acuífero (20% del total riego+lluvia) se producía durante la época de mayor demanda hídrica (época más seca y con mayor frecuencia de riego) y durante el periodo invernal de lluvias (cuando la planta tiene menor desarrollo vegetativo). Este drenaje supone unas pérdidas anuales por lixiviación de nitrógeno (nitratos) hacia el acuífero superiores a 140 kg/ha-año (en torno al 25% del total N aplicado). La tendencia moderna en la zona es al uso de riego localizado en platanera que presenta la ventaja potencial de un menor impacto ambiental.

El trabajo aquí presentado corresponde a la fase inicial del proceso de simulación de los datos experimentales, calibración, para la que se utilizó la porción inicial de los datos disponibles (año 1995). El contraste completo del

modelo se realizará en otro trabajo posterior comprobando la eficiencia del modelo sobre el resto de los datos (año 1996).

2.- Materiales y métodos.

2.1.- Experiencia de campo.

La experiencia de campo se presentó en detalle anteriormente (Muñoz-Carpena *et al.*, 1998a). Una parcela de 4800 m² de platanera propiedad de una empresa comercial fue seleccionada dentro de una zona de agricultura intensiva en el norte de Tenerife (Valle Guerra). Durante año y medio (1995-1996) se tomaron muestras semanales de suelo y agua a 3 profundidades (15, 30 y 60 cm) en 6 puntos distribuidos uniformemente en la parcela para determinar la variabilidad espacial. Las muestras fueron de 4 tipos: a) suelo; b) solución del suelo mediante cápsulas cerámicas de succión; c) agua de riego mediante 6 pluviómetros colectores; y d) agua subterránea de un manantial inmediatamente bajo la parcela. Durante el periodo experimental se recogieron y analizaron un total de 1725 muestras. En un análisis típico de suelo se determinaron el pH, conductividad eléctrica (CE₂₅), N-NO₃ y N-NH₄ soluble, y N total. De manera similar en las muestras de agua (solución del suelo, riego y manantial) se determinaron pH, CE₂₅, N-NO₃ y N-NH₄ (salvo en las muestras de cápsulas en las que el amonio es sorbido). Estos datos se completaron con muestreos de base del suelo cada 6 meses (principio, mediados y final del experimento) donde se realizó una analítica completa (pH, CE₂₅, aniones y cationes solubles y cambiables, CIC, MO, N total y P).

Se instaló una estación micrometeorológica automática en la parcela para estimar la evapotranspiración de referencia y medir temperatura del suelo a intervalos de 15 minutos, y registrar precipitación cada 5 minutos (Muñoz-Carpena *et al.*, 1996). Las variaciones en el contenido de humedad se registraron a intervalos diarios (menores en los días de riego) utilizando un equipo de TDR situado permanentemente en las 6 estaciones a las 3 profundidades. Durante el periodo se registraron también datos agronómicos (riego, fertirriego, cultivo y manejo de la plantación, cosecha, fenología, plaguicidas, enmiendas, etc.).

2.2.- El modelo WAVE.

El modelo WAVE (Water and Agrochemicals in soil, crop and Vadose Environment) describe el transporte y transformación de la materia (agua, solutos no-reactivos, formas de nitrógeno, pesticidas) y energía (calor) en la zona no saturada y planta.

WAVE es un programa de ordenador desarrollado en el Institute for Land and Water Management de la K.U.Leuven (Bélgica). La versión actual del modelo integra varias aplicaciones desarrolladas anteriormente: el modelo SWATNIT (Vereecken *et al.*, 1990; 1991), que integra el modelo SWATREER (Feddes *et al.*, 1978; Belmans *et al.*,

1983; Dierckx *et al.*, 1991), subrutinas de transporte de N y transferencia de calor tomadas de LEACHN (Wagenet and Hutson, 1989) y el modelo universal de cultivos SUCROS (van Keulen *et al.*, 1982; Spitters *et al.*, 1988). Varios módulos nuevos para flujo preferencial y pesticidas están bajo desarrollo actualmente.

El modelo está estructurado en varios módulos: i) WAT: cálculo del flujo y balance de agua en el continuo suelo-planta; ii) SOL: cálculo del balance de solutos; iii) TEMP: cálculo del balance y transferencia de calor; iv) NIT: ciclo del nitrógeno; y v) CROP: simulación del crecimiento y demandas del cultivo.

WAVE es esencialmente un modelo unidimensional a escala de columna de laboratorio o lisímetro de campo, que puede aplicarse a escala de campo (perfil de suelo) si el transporte es predominantemente vertical y se usan parámetros efectivos para describir el medio. En la dirección vertical el modelo considera la existencia de heterogeneidad en forma de horizontes en el perfil del suelo. Los horizontes se subdividen en compartimentos de suelo. En el centro de cada compartimento se ubica un nodo donde las variables de estado son calculadas mediante el método de diferencias finitas.

El intervalo temporal de cálculo en WAVE es inferior a un día para aquellos procesos que son muy dinámicos (transporte de agua, calor y solutos y transformaciones químicas). El incremento de tiempo para el cálculo se elige para reducir el error de balance de masa de la solución numérica de la ecuación de flujo de agua. Para procesos menos dinámicos (crecimiento del cultivo) se fija un paso temporal de 1 día. Las entradas del modelo se especifican diariamente, y las salidas del modelo se integran para dar salidas diarias o a intervalos mayores prefijados por el usuario.

2.3.- Parámetros de entrada del modelo.

El número de parámetros de entrada del modelo es elevado, como es de esperar de un modelo de investigación de este tipo. El énfasis en este trabajo se puso en la determinación experimental del número máximo de parámetros en nuestras condiciones según se resume en la Tabla 1.

Los parámetros de entrada relacionados con las propiedades químicas y físicas del suelo se determinaron aplicando métodos convencionales (Klute, 1986) sobre muestras alteradas e inalteradas recogidas en 7 puntos a 3 profundidades (15, 30 and 60 cm) de la parcela experimental. Las muestras se trataron independientemente a cada profundidad para obtener una medida de variabilidad espacial (\pm error estándar en Tablas 2 y 3).

Las propiedades hidráulicas del suelo se midieron a partir de muestras inalteradas (tomadas en anillos USDA de 7.62 cm) usando células Tempe y permeámetros de altura constante de laboratorio y campo (Guelph). Las curvas de succión del suelo se ajustaron a la ecuación de van Genuchten, disponible en el modelo WAVE.

Tabla 1. Origen de los parámetros de entrada del modelo WAVE usados en la simulación

Clase	A partir de medidas	De la literatura
Clima	Radiación global, precipitación, temperatura del aire, interceptación, evapotranspiración de referencia (ET _o).	---
Hidráulica del suelo	Humedad a saturación y residual, valor de entrada de aire, conductividad hidráulica saturada, parámetros de las curvas de succión y conductividad hidráulica insaturada.	--
Absorción de agua por la planta	k_c (coeficiente de cultivo que relaciona la ET _o y la ET del cultivo)	Absorción máxima de agua por raíces de planta, reducción de absorción radicular en función de la succión del suelo.
Condición de contorno inferior en ecuación de flujo	Flujo de agua o potencial de presión en la parte inferior del perfil del suelo.	--
Valores iniciales en ecuación de flujo	Contenido inicial de humedad del suelo o succión	--
Transporte de solutos en el suelo	dispersividad hidrodinámica, densidad aparente del suelo, modelo de sorción de soluto en suelo (equilibrio local).	Coeficiente de difusión química del soluto en agua pura, parámetros que relacionan la difusión en suelo en agua.
Condición de contorno superior para la ecuación de transporte de solutos	Aplicación/entrada de solutos al suelo.	--
Transformación de nitrógeno	Relación C/N de la biomasa (cultivo).	Constantes de 1 ^{er} orden de nitrificación y desnitrificación, constantes de 1 ^{er} orden de descomposición de restos vegetales, estiércol y humus, eficiencia de mineralización de la materia orgánica, fracción de humificación.
Nitrógeno del cultivo	Fracción de materia seca sobre el suelo al final de la cosecha o ciclo del cultivo.	Materia seca de la raíz viva de la planta al final del ciclo, diámetro radicular medio, distancia media entre la solución del suelo y la superficie radicular.
Valores iniciales para transporte de N	Distribución inicial de amonio y nitrato en el perfil del suelo.	C y N inicial en la fracción del suelo de restos vegetales, estiércol y humus
Crecimiento del cultivo	Densidad de plantación, función LAI	--
Desarrollo radicular	Profundidad radicular máxima.	--

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo en la parcela experimental.

Prof. (cm)	K_s (cm/h)	ρ_b (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	P (cm ³ /cm ³)	Parámetros de van Genuchten			Textura (USDA) ¹
					α	n	θ_r	
15	13.0 ± 3.77	1.09 ± 0.06	2.51 ± 0.19	0.55 ± 0.02	0.66 ± 0.04	1.10 ± 0.05	0.10 ± 0.03	A
30	8.38 ± 2.08	1.18 ± 0.06	2.49 ± 0.06	0.52 ± 0.03	0.50 ± 0.04	1.10 ± 0.05	0.10 ± 0.03	A
60	7.65 ± 2.18	1.09 ± 0.10	2.34 ± 0.20	0.49 ± 0.03	0.28 ± 0.04	1.13 ± 0.05	0.11 ± 0.03	A-F

¹ A= Arcilloso; F= Franco

Tabla 3. Propiedades químicas del suelo en la parcela experimental.

Prof. (cm)	MO (%)	CE ₂₅ (dS/m)	pH	CIC (meq/100g)	N-NH ₄ Kd	Dispersividad λ (cm)
15	2.32 ± 0.79	1.49 ± 0.25	6.44 ± 0.62	37.1 ± 3.40	10.1 ± 2.8	2.88 ± 1.97
30	1.70 ± 0.63	1.34 ± 0.39	6.33 ± 0.59	33.7 ± 2.24	13.3 ± 3.6	4.58 ± 3.45
60	1.03 ± 0.24	1.47 ± 0.26	7.27 ± 0.17	32.0 ± 2.75	18.9 ± 4.1	4.80 ± 2.59

Para obtener el parámetro de dispersividad hidrodinámica (Tabla 3) y establecer la validez del modelo de equilibrio local para el transporte de solutos se obtuvieron curvas de ruptura utilizando un soluto no-sorbible, no-reactivo (PFB) (Alvarez-Benedí *et al.*, 1998). Para ello se empaquetaron muestras alteradas de suelo en 72 columnas de acero inoxidable (2 cm Ø - 10 cm. largo). Las constantes de adsorción se determinaron en laboratorio mediante ensayos tipo "batch".

No hay referencias en la documentación del modelo sobre el cultivo de platanera. La función de índice de área foliar (LAI) es un parámetro de gran importancia pues regula absorción de agua y nutrientes del suelo. La función fue

construida siguiendo a Turner (1972) y Stover (1981) a partir de medidas independientes de área foliar para el cultivar (cv.) "pequeña enana" (Galán, 1981) y área sombreada (Suárez, 1994) en la zona (Tabla 4 y Fig. 1).

Tabla 4. Función del índice de área foliar en platanera utilizada.

Fecha(dd/mm)	Día juliano	LAI (m ² /m ²)
01/01	1	3.49
21/03	80	2.00
20/05	140	0.52
26/07	207	2.24
11/11	315	4.00
31/12	365	3.44

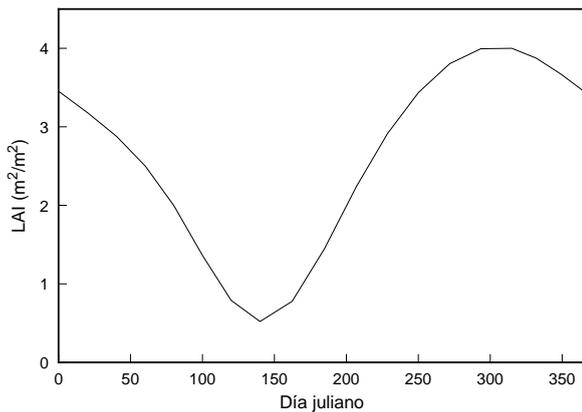


Fig. 1. Función del índice de área foliar en platanera utilizada.

Para determinar la relación C/N de la biomasa se tomaron 52 muestras de hoja de platanera en el momento del corte de la planta madre resultando 27.07 ± 0.42 (CV=11%). Otros parámetros del cultivo como producción trimestral (10540, 2353, 11880, 7890 kg/ha fruta fresca), marco de plantación (2.5 x 2.5 m) y máxima profundidad radicular (0.5 m) fueron obtenidos en campo.

Los parámetros climáticos diarios se obtuvieron de la estación micrometeorológica automática in-situ y los coeficientes de cultivo (K_C) en la zona de Suárez (1994). La Tabla 5 muestra el resumen mensual de los datos.

Tabla 5. Resumen mensual de parámetros climáticos del periodo.

Mes	$T_{m_{max}}$ (°C)	$T_{m_{min}}$ (°C)	$T_{m_{dew}}$ (°C)	Rad (ly/day)	$U_{3.5}$ (Km/d)	P (mm)	ET_{OPM} (mm/d)	K_C ET/ET _{OPM}
7	27.3	20.7	18.8	522.2	101.1	0.0	3.7	0.77
8	28.0	20.2	18.9	488.3	82.6	4.4	3.5	0.94
9	26.8	19.7	17.5	426.8	67.5	3.8	3.0	1.08
10	26.1	17.7	17.9	293.8	53.4	15.6	1.9	1.21
11	25.0	16.9	15.5	285.1	67.4	77.0	1.9	1.21
12	22.2	15.1	12.8	265.1	100.9	61.5	1.8	1.13

$T_{m_{max}}$ = media de temperaturas máximas diarias; $T_{m_{min}}$ = media de temperaturas mínimas diarias; $T_{m_{dew}}$ = media de temperaturas medias de rocío diarias; Rad = media radiación solar media diaria; $U_{3.5}$ = media de transporte de viento diario; P = precipitación mensual; ET_{OPM} = media de evapotranspiración de referencia diaria (Penman-Monteith).

Los valores iniciales de las ecuaciones de flujo de agua y transporte de solutos se tomaron de los muestreos de base del suelo al principio del experimento. Las condiciones de contorno para ambas ecuaciones se obtuvieron de los datos registrados en los 6 pluviómetros colectores distribuidos en la parcela (Tabla 6).

Tabla 6. Fertilización aplicada en la parcela durante el periodo experimental

Fecha	Día juliano	N-NO ₃ (kg/ha)	N-NH ₄ (kg/ha)
28/07/95	209	38.02	34.27
25/08/95	237	32.34	30.13
22/09/95	265	93.04	38.98
24/11/95	328	43.65	49.95
N total periodo = 360.4 kg/ha		207.1	153.3

3.- Resultados y discusión.

El modelo WAVE predice bien el flujo y distribución del agua del suelo, especialmente a las profundidades de 15 y 30 cm (Figura 2). Estos resultados fueron obtenidos tras la composición de los archivos de entrada del modelo utilizando los parámetros determinados experimentalmente y sin calibración. Los buenos resultados obtenidos para el flujo con el modelo no son nuevos, otros autores han obtenido resultados igualmente satisfactorios en trabajos previos (ver revisión de Muñoz-Carpena *et al.*, 1998b). Esto indica la correcta implementación que WAVE hace del estado del arte de la tecnología de flujo en suelos. Aunque no es frecuente realizar una determinación experimental exhaustiva de los parámetros de entrada de un modelo, debido a que el esfuerzo invertido es posiblemente más caro que el de la calibración tradicional, es interesante señalar que el procedimiento nos permitió evaluar la buena capacidad predictiva y fiabilidad del modelo en nuestras condiciones. Esto se traducirá en una mayor rentabilidad en su aplicación como herramienta de análisis o predictiva.

Los resultados obtenidos para el transporte de nitrógeno en el suelo son peores que los obtenidos en el caso anterior (Figs. 2 a 4). Los valores simulados están dentro del rango de los observados en campo pero hay una falta de respuesta a las aplicaciones de fertilizante que sí se registra en los datos de campo, especialmente en los horizontes más profundos.

Una fuente de error, típica de estos estudios, podría ser la variabilidad de los valores observados. Las Figuras 3 y 4 muestran esta variabilidad en forma de barras de error estándar entre medidas a la misma profundidad entre los 6 puntos de muestreo (los coeficientes de variabilidad medios a las 3 profundidades son para N-NO₃ 38.8, 37.2 y 35.5%; y 50.9, 43.0, 49.7% para N-NH₄). Como se ve en la Figura el error de predicción supera el rango de variabilidad de los datos observados, por lo que no se puede designar éste como un factor determinante. Otra fuente de error podría ser la variabilidad de los parámetros de entrada (ver error en dispersividad en la Tabla 3). Esto se determinará mediante un análisis de sensibilidad del modelo que incluya la citada variabilidad y será objeto de un trabajo posterior. Este factor es más importante en el caso de que el valor haya sido estimado a partir de datos de la literatura ya que no hay un conocimiento experimental de la variabilidad de dicho parámetro (Tabla 1). Vanclouster (1995) señala las constantes de reacción del ciclo del N como parámetros sensibles en WAVE.

La tendencia en el tiempo presentada en las predicciones apunta a la existencia de problemas en la absorción del N por parte de la planta (inferior a la real), lo que resulta en mayor cantidad de N disponible para el transporte, en definitiva mayor N movilizado hacia los horizontes inferiores que el observado. Esto se ve claramente en el periodo de los días 280-380, donde el modelo simula una reducción en N-NO₃ en los horizontes superiores y un aumento en el superior, que es contrario a lo observado en campo. La misma tendencia errónea se aprecia en el

periodo 240-260 donde los datos de campo muestran una reducción de $N-NO_3$ con en el tiempo a 15 cm y las predicciones dan la tendencia contraria.

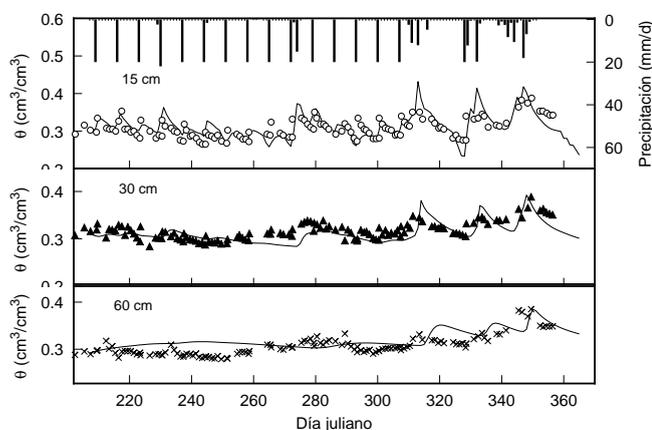


Fig. 2. Humedad del suelo (símbolos= observado; líneas= WAVE)

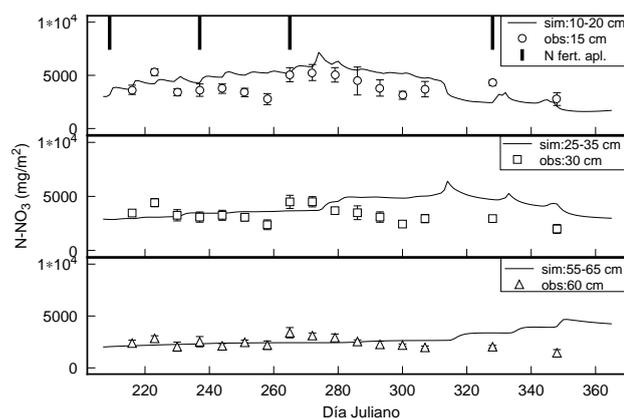


Fig. 3. Nitratos en el suelo (símbolos= observado; líneas= WAVE)

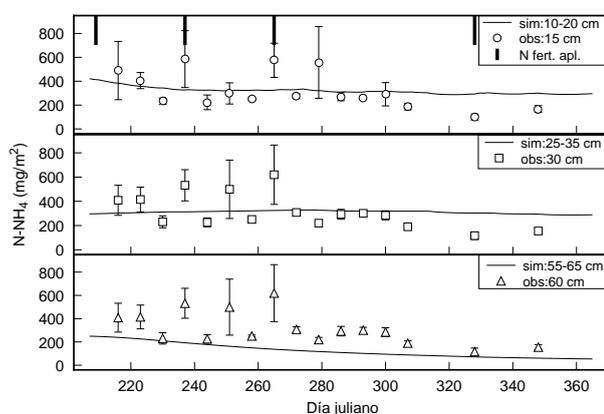


Fig. 4. Amonio en el suelo (símbolos= observado; líneas= WAVE)

La función de absorción de nutrientes utilizada en WAVE es parcialmente responsable de esta respuesta. WAVE

implementa una función monótonica creciente con el tiempo a lo largo del cultivo que alcanza un máximo en la fructificación y decae después hasta el final del cultivo. Este esquema es típico de cultivos herbáceos. La fenología de la platanera es sin embargo cíclica como se observa en la curva del LAI (Fig. 1). Ello implica la conveniencia de una modificación de dicha función para atender al caso particular de cultivos cíclicos permanentes como la platanera.

4.- Conclusiones.

Los resultados obtenidos con el modelo WAVE demuestran que el modelo presenta buena capacidad predictiva y fiabilidad lo que se traducirá en una mayor rentabilidad en su aplicación como herramienta de análisis. El esfuerzo invertido en la determinación experimental de los parámetros de entrada permite una además reducción en el trabajo de calibración del modelo, aunque posiblemente a un costo superior que si se hubiera recurrido a una calibración tradicional usando valores de la literatura.

Las predicciones del modelo obtenidas para el flujo de agua durante el periodo experimental son buenas y dentro del rango observado en campo para el nitrógeno. Se sugiere una modificación en la función de absorción del N para tener en cuenta la naturaleza cíclica de la fenología de la platanera.

Agradecimientos. Los autores agradecen a A. R. Socorro (ICIA) la realización e interpretación de los análisis químicos contenidos en el trabajo, al Prof. J. Feyen del ILWM (Bélgica) por el uso del modelo WAVE y recibir al primer autor del trabajo en el ILWM durante la puesta a punto inicial del modelo con los datos de campo. El trabajo ha sido financiado con fondos del INIA-Plan Nacional de I+D Agrario (Proyecto SC95-059).

Referencias.

- Álvarez-Benedí, J., R. Muñoz-Carpena, A. Heguedas, S. Bolado, A.R. Socorro. 1998. Estimación de la dispersividad en un suelo arcilloso sorribado en experimentos de transporte en columnas. En: A. González y E. Romero (eds.). *Progresos en la Investigación en Zona no Saturada*. pp. 129-147. Univ. Huelva: Huelva.
- Dierckx, J., C. Belmans y P. Pauwels, 1986. *SWATREX, a computer package for modelling the field water balance*. Reference manual. Soil and Water Engng. Lab., K.U. Leuven, Belgium, 114 pp.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik y H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs, PUDOC*, Wageningen, The Netherlands. 189 pp.
- Galán, V. (1981). Estudio de la práctica del deshidado y de la fenología de la platanera en la isla de Tenerife. *Tesis doctoral*. Univ. de Córdoba: Córdoba.
- Klute, A. (ed). 1986. Methods of Soil Analysis. 2nd. Ed. *Agronomy monograph no.9*. Madison:ASA-SSSA.
- Muñoz Carpena, R., D. Fernández Galván, G. González Tamargo y P. Harris. 1996a. Diseño y evaluación de una estación micrometeorológica de bajo coste para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. *Riegos y Drenajes XXI*, 88:17-25.
- Muñoz-Carpena, R., A.R. Socorro, G. González, N. Pérez y R. Poncela, 1997. Field monitoring of nitrogen evolution and fate in a Canary Islands (Spain) sprinkler fertigated banana plot. *Paper of ASAE no. 97-*

- 2108.ASAE: St. Joseph.
- Muñoz-Carpena, R., A.R. Socorro, G. González y N. Pérez. 1998a. Aspectos hidrológicos de la contaminación por nitratos de suelos y aguas por riego de platanera en Canarias. En: A. González y E. Romero (eds.). *Progresos en la Investigación en Zona no Saturada*. pp. 211-226. Univ. Huelva: Huelva.
- Muñoz Carpena, R., M. Vanclooster y E. Villacé., 1998b. Evaluation of the WAVE model. (Monograph in preparation, SW21 ASAE).
- Parsons, J.E. y Muñoz-Carpena, R. 1999. GLEAMS modeling of nitrate transport and fate in a bananas subtropical agrosystem. *Paper of ASAE no. 99-2216*. ASAE: St. Joseph.
- Spitters, C.J.T., H. Van Keulen y D.W.G. Van Kraailingen, 1988. A simple but universal crop growth simulation model, SUCRO87. En: R. Rabbinge, H. Van Laar y S. Ward (eds). *Simulation and systems management in crop protection*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, The Netherlands.
- Stover, R.H. 1981. 'Valery' and 'Grand Nain': plant and foliage characteristics and a proposed banana ideotype. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 59:(4):303-305
- Suárez, C.L. 1994. Evapotranspiración de la platanera y respuestas fisiológicas al régimen de riego. *Tesis Doctoral*. Univ. La Laguna: La Laguna.
- Turner, D.W. 1990. Modelling demand for nitrogen in the banana. *Acta Horticulturae*, 275:497-503.
- Van Keulen, H., F.W.T. Penning de Vries a E.M. Drees. 1982. A summary model for crop growth. In: F.W.T. Penning de Vries y H.H. van Laar (eds.). *Simulation of crop growth and crop production*. PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 87-98.
- Vereecken H., M. Vanclooster y M. Swerts, 1990. A simulation model for the estimation of nitrogen leaching with regional applicability. En: R. Merckx y H. Vereecken (eds.). *Fertilization and the environment*. Leuven Academic Press, Belgium, 250-263.
- Vereecken H., M. Vanclooster, M. Swerts y J. Diels, 1991. Simulating water and nitrogen behaviour in soil cropped with winter wheat. *Fertilizer Research*, 27: 233-243.
- Wagenet R. y J. Hutson, 1989. *LEACHM, a process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone*. Centre for Environ. Res., Cornell University, Ithaca, N.Y., 147 pp.
- Vanclooster M., 1995. Nitrogen transport in soil: theoretical, experimental and numerical analysis. *Tesis doctoral*, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen. 220 pp.
- Vanclooster M., P. Viaene, K. Christiaens y S. Ducheyne, 1996. *WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment*. Reference and user's manual (release 2.1), Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.