



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

37056

**ESTUDIO DE LA EVOLUCION DE LOS  
COMPUESTOS DEL NITROGENO EN EL  
SUELO Y SUBSUELO**

**ITGE, 2<sup>a</sup> FASE 1989-1990**

**PARTE IV**  
**SIMULACION DE TRANSPORTE Y TRANSFORMACION DE ESPECIES**  
**NITROGENADAS EN LA ZONA NO SATURADA**

## PARTE IV

### INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
2. SELECCION DEL MODELO	4
3. DESCRIPCION DEL MODELO	6
3.1. Ecuación de flujo	7
3.2. Ecuación de transporte de especies nitrogenadas	7
3.3. Extracción de agua y especies nitrogenadas por las plantas	10
3.4. Transformaciones de las especies nitrogenadas	12
3.5. Método numérico de solución	13
3.6. Condiciones de borde	14
3.6.1. Condiciones de borde en el techo del sistema	14
3.6.2. Condiciones de borde en el fondo del sistema	14
3.7. Resultado del modelo	15
4. DATOS INCORPORADOS AL MODELO	16
4.1. Discretización	17
4.2. Parámetros del terreno	17

4.2.1. Curvas de retención	17
4.2.2. Conductividad hidráulica	19
4.3. Condiciones iniciales	20
4.4. Condiciones de borde	23
4.4.1. Condiciones de borde en el techo del sistema	23
4.4.2. Condición de borde en el fondo del sistema	28
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>29</b>
5.1 Período de junio de 1989	30
5.2 Período de septiembre de 1989	34
<b>6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS</b>	<b>51</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>55</b>

## PARTE IV

### INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.1. Discretización del perfil para el modelo LEACHN. Situación de tomamuestras de succión	18
Figura 4.2. Comparación de las permeabilidades utilizadas en la simulación de flujo (SWATRE) y transporte (LEACHN)	21
Figura 4.3. Perfil de humedad (30/5/89)	25
Figura 4.4. Perfil de humedad (5/9/89)	25
Figura 4.5. Perfiles de nitrato y amonio(30/5/89)	26
Figura 4.6. Perfiles de nitrato y amonio (5/9/89)	27
Figura 5.1. Perfiles reales y calculados en la simulación	33
Figura 5.2. Perfiles reales y calculados en la simulación	37
Figura 5.3. Perfiles reales y calculados en la simulación	40
Figura 5.4. Perfiles reales y calculados en la simulación	42
Figura 5.5. Perfiles reales y calculados en la simulación	49
Figura 5.6. Perfiles reales y calculados en la simulación	50

## PARTE IV

### INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Lluvias, riegos y concentraciones de especies nitrogenadas para la simulación del 30-5-89 al 28-6-89	24
Tabla 4.2 Lluvias, riegos y concentraciones de especies nitrogenadas para la simulación del 5-9-89 al 5-10-89	24
Tabla 4.3 Profundidad del agua subterránea en los períodos de simulación	28
Tabla 5.1 Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el período de junio de 1989	31
Tabla 5.2 Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el período de septiembre de 1989 (Dispersividad de 40 mm)	38
Tabla 5.3 Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el período de septiembre de 1989 considerando presencia de urea	45
Tabla 5.4 Balances de agua, especies nitrogenadas y cloruros obtenidos por LEACHN en el período de septiembre de 1989	47

## **1. INTRODUCCION**



## 1. INTRODUCCION

En las secciones anteriores de este estudio se han expuesto en primer lugar los datos existentes en nuestra zona, a fin de enmarcar el medio físico en el que se producen el flujo y el transporte de especies nitrogenadas en la zona no saturada, para posteriormente realizar una modelización de la evolución temporal del contenido de humedad y composición química para un perfil seleccionado en la parcela experimental E-2.

De estos estudios se han obtenido unos primeros balances estimativos de la cantidad de agua que pasa al nivel freático y del volumen de agua extraído por las raíces de las plantas o que se pierde por evaporación. Así mismo, se han planteado los principales procesos que afectan a las especies nitrogenadas estudiadas, tanto en lo referente a su transporte como un soluto en disolución como a su transformación por procesos biológicos o puramente químicos.

En la parte que se desarrolla a continuación se plantea un estudio global de todos los procesos definidos en las partes II y III de este informe mediante la utilización de un modelo de movimiento de agua y solutos que considera las posibles transformaciones de los compuestos nitrogenados y su extracción por las plantas en la zona no saturada.

Mediante la aplicación de un modelo de este tipo se pretende, tras reproducir las condiciones de flujo que se obtuvieron en la parte II por la aplicación de un modelo de flujo de agua, simular la evolución de los perfiles de

concentración de nitrato obtenidos en campo (Parte III) para, al final, aportar un balance aproximado de las masas en juego para las condiciones consideradas.

## **2. SELECCION DEL MODELO**

## 2. SELECCION DEL MODELO

En el apartado 2.1 de la Parte II del presente estudio se describieron las características más importantes de los modelos disponibles a fin de realizar la selección del más adecuado para simular el flujo en la zona no saturada. Entre los modelos comentados entonces se encontraban cuatro (WASTEN, LEACHN, PRZM y SUTRA), que son modelos de transporte de diferentes tipos que, lógicamente, incluyen una modelización previa del flujo a fin de establecer el campo de velocidades sobre el que se va a aplicar la ecuación de la dispersión en medio no saturado.

De estos modelos, SUTRA es de tipo bidimensional y no está diseñado específicamente para el tratamiento de problemas tan puntuales como el que nos ocupa. Por otra parte, considera tan sólo el transporte de especies conservativas.

Por otro lado, PRZM está orientado básicamente a simular el flujo y los procesos que afectan a pesticidas.

De los dos modelos restantes, WASTEN y LEACHN, se ha elegido el último para su aplicación en nuestro caso dado que es el que mejor se adapta al tipo de procesos existentes en la zona de estudio. Este modelo, como se describe más detalladamente en el apartado siguiente, permite un tratamiento de los límites inferior y superior más amplio que WASTEN. Asimismo la adaptación de los datos obtenidos del modelo de flujo es más sencilla y representa con mayor precisión los procesos descritos en la zona de estudio.

### **3. DESCRIPCION DEL MODELO**

### 3. DESCRIPCION DEL MODELO

#### 3.1. Ecuación de flujo

El modelo LEACHN describe el flujo de agua en la zona no saturada mediante una ecuación idéntica a la (2) que se formula en el apartado 2.2.1 de la Parte II.

#### 3.2. Ecuación de transporte de especies nitrogenadas

El movimiento de una especie química a través de un suelo se debe fundamentalmente a cuatro procesos:

- a) Difusión química en la fase líquida en respuesta a un gradiente de concentración
- b) Si la especie química es volátil, difusión en la fase gaseosa en respuesta a un gradiente de concentración de gas
- c) Advección debida al movimiento del agua
- d) Convección de la especie química en la fase de vapor debida al movimiento del aire por fluctuaciones en la presión barométrica, ciclos de mojado y secado, así como fluctuaciones del nivel freático

Además, pueden producirse adiciones o extracciones de especies químicas.

El proceso de difusión en la fase líquida se describe mediante la Ley de Fick:

$$F_{DL} = -D_p(\theta) \frac{\partial c_L}{\partial z} \quad (1)$$

donde

$F_{DL}$  es el flujo debido a difusión en fase líquida

$D_p(\theta)$  es el coeficiente de difusión efectiva

$c_L$  es la concentración en la fase líquida

$z$  es la profundidad

La difusión en la fase gaseosa está igualmente regida por la Ley de Fick. En este caso, no obstante, en vez de las concentraciones, se consideraron las presiones de vapor y el coeficiente de difusión gaseosa en el aire ( $\text{mm}^2/\text{d}$ ).

El transporte por advección (o convección) se representa normalmente por:

$$F_{CL} = -\theta D_m(q) \frac{\partial c_L}{\partial z} + q c_L \quad (2)$$

donde

$F_{CL}$  es el flujo total por dispersión-advección

$\theta$  es el contenido de humedad

$D_m(q)$  es el coeficiente de dispersión mecánica

$c_L$  es la concentración de la especie química en la fase líquida

$q$  es la velocidad de Darcy

El valor de  $D_m(q)$  puede ser estimado a partir de:

$$D_m(v) = \lambda |v| \quad (3)$$

donde

$v$  es la velocidad real del fluido ( $v = q/\theta$ )

$\lambda$  es la dispersividad

Por último, la convección en la fase gaseosa se produce debido a que cambios en el contenido de agua en el suelo, presión barométrica o temperatura originan que el aire se desplace en el suelo. Debido a la naturaleza cíclica de esos cambios, sus efectos pueden ser simulados aumentando el coeficiente de difusión gaseosa.

De los cuatros procesos descritos, los b) y d) son importantes en el caso de las simulaciones del movimiento de pesticidas en la zona no saturada. Para el caso que nos ocupa, sin embargo, los procesos a) y c) que consideran la difusión molecular debida a gradientes de concentración y la dispersión-advección, respectivamente, son, junto con la extracción de especies nitrogenadas por las plantas y los procesos de transformación entre especies, los que determinan su distribución en el perfil.

Considerando que el transporte de especies químicas se produce en general en condiciones de flujo de agua en régimen transitorio, puesto que el contenido de humedad y la velocidad del agua varían con la profundidad y el tiempo, se puede obtener la ecuación general del transporte de solutos, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t}(\theta + \rho K_d) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \theta D(\theta, q) \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right] \pm \phi \quad (4)$$

donde

$c$  son las concentraciones en la solución

$\theta$  es el contenido de humedad

$K_d$  es el coeficiente de distribución

$D$  es el coeficiente de dispersión



$q$  es la velocidad de Darcy

$\phi$  son aportes (o extracciones) externos (extracciones por las plantas + transformaciones)

### 3.3. Extracción de agua y especies nitrogenadas por las plantas

El modelo LEACHN calcula la extracción de agua por las raíces para un nodo  $i$  durante el intervalo de tiempo de  $j-1$  a  $j$  del siguiente modo:

$$U_i^{j-\frac{1}{2}} = \left[ H_r + z_i(1 + R_c) - h_i^{j-\frac{1}{2}} \right] \left[ RDF_i^{j-\frac{1}{2}} K_i^{j-\frac{1}{2}} / \Delta x \Delta z \right] \quad (5)$$

donde

$U$  es el término de extracción por transpiración de las plantas (día<sup>-1</sup>)

$H_r$  es el potencial de agua en las raíces. Es el valor que, junto con el de punto de marchitez, limita la transpiración

$R_c$  es un coeficiente propio de cada planta que representa la resistencia del agua a fluir a las raíces

$h$  es el potencial mátrico en la celda

$RDF$  es la fracción del total de las raíces que está presente en la celda en cuestión

$K$  es la conductividad hidráulica

Mediante un proceso iterativo, LEACHN calcula un valor de  $H_r$  tal que la cantidad de agua extraída en toda la longitud de las raíces sea igual a la transpiración potencial, con las restricciones de que 1) el agua no puede fluir de las raíces al suelo; 2) el valor de  $H_r$  debe estar entre 0 y un valor inferior especificado (normalmente unos

- 30000 cm  $\approx$ pF = 4.5) y 3) no puede extraerse agua del suelo en concepto de transpiración para presiones inferiores al punto de marchitez.

En suelos más secos, la transpiración real será inferior a la potencial.

En lo referente a la extracción de nitrógeno por las plantas, se considera que ésta es una función de la densidad de las raíces y de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ .

El flujo de nutrientes a la superficie de las raíces se calcula según la expresión:

$$I = 2\alpha r c \quad (6)$$

donde

$I$  es la tasa de extracción de nutrientes por unidad de longitud de raíces (mg/m - día)

$r$  es el radio medio de las raíces (m)

$c$  es la concentración de nutrientes en la solución (mg/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  es el coeficiente de extracción (m/día)

Warncke y Barber (1973) desarrollaron ecuaciones de regresión relacionando  $\alpha$  con la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  para el maíz. Estas ecuaciones son:

$$\log \alpha_{\text{NH}_4^+} = -6.81 - 0.63 \log [\text{NH}_4^+] - 116.8 [\text{NO}_3^-] \quad (7)$$

$$\log \alpha_{\text{NO}_3^-} = -6.80 - 0.61 \log [\text{NO}_3^-] - 127.1 [\text{NH}_4^+] \quad (8)$$

donde  $[\text{NH}_4^+]$  y  $[\text{NO}_3^-]$  son concentraciones en moles/litro.

Si  $L$  representa la densidad de raíces ( $m/dm^3$ ) y  $t$  es el tiempo, la extracción por la planta para un intervalo de tiempo  $\Delta t$  por  $dm^3$  de suelo se calcula según:

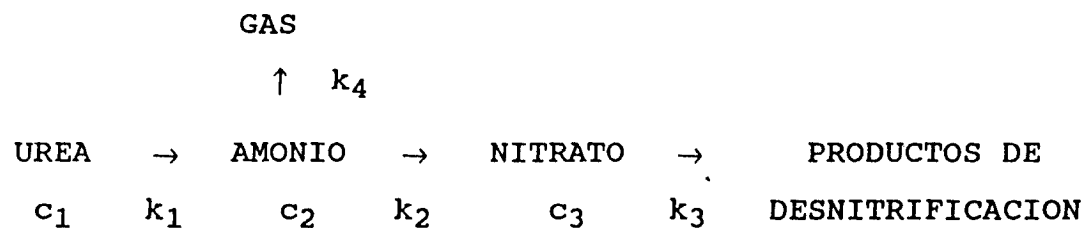
$$U = 2\pi r c \alpha L \Delta t \quad mg/dm^3 \quad (9)$$

y el cambio en la concentración es  $U/\theta$   $mg/l$  donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de humedad.

Las limitaciones a esto son: a) la extracción de especies nitrogenadas por las plantas en un volumen de suelo dado no puede ser superior a la cantidad de nitrógeno presente en ese volumen, y b) la extracción se produce sólo durante los períodos de transpiración.

### 3.4. Transformaciones de las especies nitrogenadas

La transformación de un abono nitrogenado se supone que presenta los siguientes pasos:



donde

$k_1$  representa la hidrólisis de urea a amonio

$k_2$  la nitrificación de amonio a nitrato

$k_3$  la conversión de nitratos a producto de desnitrificación

$k_4$  la volatilización de amonio

$c_1, c_2, c_3$  las concentraciones de las especies

El soluto, sea urea,  $\text{NH}_4^+$  o, en ocasiones,  $\text{NO}_3^-$ , está distribuido entre una fase absorbida y otra en solución.

Se asume que cada transformación está regida por cinética de primer orden. Si las tasas  $k_i$  se aplican tanto a la fase absorbida como a la solución, entonces los términos  $\phi$  de la ecuación (4) para cada especie se calculan como:

$$\phi_{UREA} = -k_1 c_1 (\theta + \rho K_{d1})$$

$$\phi_{AMONIO} = k_1 c_1 (\theta + \rho K_{d1}) - k_2 c_2 (\theta + \rho K_{d2}) - k_4 c_4 (\theta + \rho K_{d4})$$

$$\phi_{NITRATO} = k_2 c_2 (\theta + \rho K_{d2}) - k_3 c_3 (\theta + \rho K_{d3})$$

Si las tasas  $k_i$  se aplican sólo a los compuestos nitrogenados en solución, el término  $\phi$  se calcula según:

$$\phi_{UREA} = -k_1 c_1 \theta$$

$$\phi_{AMONIO} = \theta (k_1 c_1 - k_2 c_2 - k_4 c_4)$$

$$\phi_{NITRATO} = \theta (k_2 c_2 - k_3 c_3)$$

La elección de si las constantes  $k_i$  se aplican sólo a la fase líquida o también a la absorbida puede ser realizada por el usuario.

Por último, la volatilización de amonio se supone que se realiza tan sólo en la celda superior.

### 3.5. Método numérico de solución

LEACHN utiliza un esquema implícito en diferencias finitas para resolver tanto la ecuación de flujo como la de transporte. El sistema de ecuaciones se resuelve para unas condiciones de borde dadas usando el algoritmo tri-diagonal de Thomas.

### **3.6. Condiciones de borde**

#### **3.6.1. Condiciones de borde en el techo del sistema**

La condición de borde superior puede ser variable con el tiempo según se produzca infiltración, evaporación o flujo nulo.

Si la infiltración procede de agua que encharca el suelo, el potencial de presión de la primera celda se iguala a cero.

La evaporación y la infiltración (si no se produce por encharcamiento) son tratados por LEACHN del mismo modo, calculando las tasas en función de las permeabilidades y presiones de succión de las dos celdas más altas de la columna modelada.

#### **3.6.2. Condiciones de borde en el fondo del sistema**

El modelo LEACHN permite la consideración de cinco tipos de condición de borde inferior:

- 1º. Nivel freático a profundidad constante
- 2º. Nivel freático a profundidad variable
- 3º. Perfil con drenaje libre (gradiente unidad)
- 4º. Borde impermeable (flujo nulo)
- 5º. Un tanque lisimétrico. Es una combinación de los tipos primero y cuarto. El agua puede salir del lisímetro cuando la capa del fondo está saturada o tiene un potencial de presión superior al del sistema de drenaje. Además el fondo del sistema es impermeable

### **3.7. Resultados del modelo**

Los resultados que da el modelo son fundamentalmente tres: En primer lugar, un balance tanto de agua como de las especies nitrogenadas presentes, en el que se especifican las variaciones producidas por lluvias, riegos, evaporación, extracción por las plantas, etc. Por otra parte, se obtienen las presiones, humedades, flujos y contenidos de las especies nitrogenadas para cada celda de la columna simulada.

Por último, se obtienen también los datos relativos a las plantas, en las que se especifica para cada día la distribución de las raíces y las cantidades de agua y nitrógeno extraídas por las plantas en toda la longitud del perfil simulado.

#### **4. DATOS INCORPORADOS AL MODELO**

## **4. DATOS INCORPORADOS AL MODELO**

### **4.1. Discretización**

LEACHN no permite, al contrario que SWATRE, la utilización de celdas de tamaño variable. Por ello, y a fin de que la simulación contase con el suficiente detalle en profundidad, se ha elegido un tamaño de celda de 10 cm. El número de celdas activas es, para una longitud de columna de 4.5 m, de 45.

En este caso, las tres capas simuladas tienen una potencia ligeramente diferente a la considerada en SWATRE (Fig. 2.4, Parte II). Así, la primera capa ocupa 11 celdas, por lo que su fondo se localiza a una profundidad de 110 cm. La segunda capa ocupa 9 celdas, por lo que su fondo está a 200 cm de profundidad respecto al suelo. La tercera y última capa se extiende desde esa profundidad hasta los 450 cm considerados (Fig. 4.1).

Los criterios para la elección de estas capas son los mismos que se comentaron en el apartado 2.3.1 de la Parte II.

### **4.2. Parámetros del terreno**

#### **4.2.1. Curvas de retención**

El modelo LEACHN permite la consideración de capas de distintas características hidráulicas, al igual que SWATRE. No obstante, la forma de introducir los parámetros que definen tales características es diferente.

Así, las curvas de retención de humedad se definen por la siguiente ecuación:



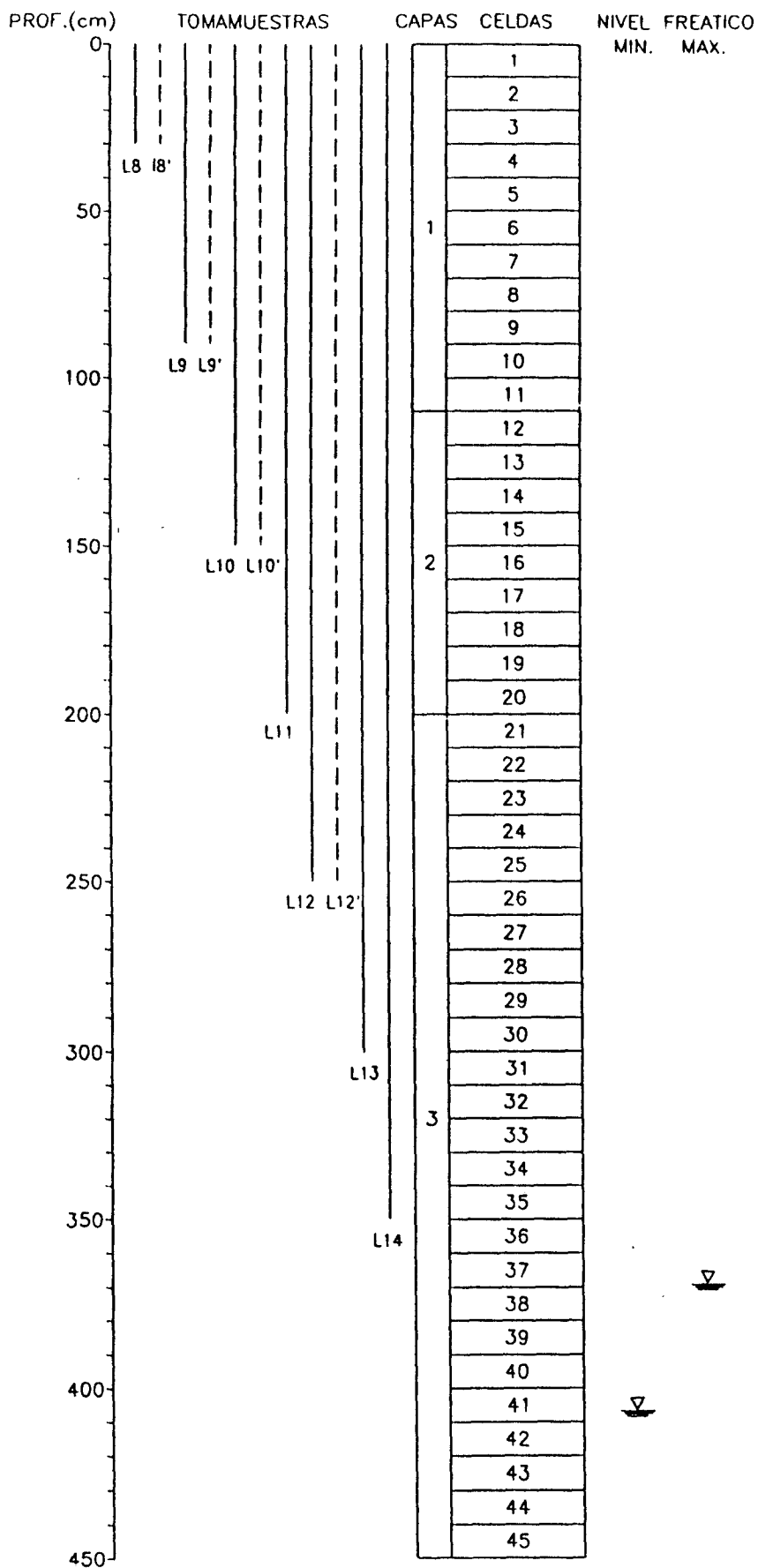


Fig.4.1. -Discretizacion del perfil para el modelo LEACHN.  
Situacion de tomamuestras de succion.

$$h = \alpha(\theta/\theta_s)^{-b}$$

donde

$h$  es el potencial mátrico

$\theta$  es el contenido volumétrico de humedad

$\theta_s$  es el contenido de agua en saturación

$\alpha, b$  son constantes

Las constantes  $\alpha$  y  $b$  son los valores que deben ser introducidos al modelo. Su obtención se ha realizado mediante ajuste de una curva potencial de los mismos valores de humedad y presión de succión que se utilizaron para la simulación del flujo (apartado 2.3.3.1, Parte II).

Los ajustes han dado los siguientes resultados:

$$\text{CAPA 1: } h(kPa) = -3.715(\theta/\theta_s)^{-3.657}; \theta_s = 0.5$$

$$\text{CAPA 2: } h(kPa) = -1.594(\theta/\theta_s)^{-4.776}; \theta_s = 0.4$$

$$\text{CAPA 3: } h(kPa) = -0.846(\theta/\theta_s)^{-2.237}; \theta_s = 0.365$$

Estos ajuste reproducen con bastante calidad las curvas de retención originales para el rango de humedades presentes en cada capa en los períodos en que se ha simulado el transporte de especies nitrogenadas.

#### 4.2.2. Conductividad hidráulica

La ecuación que emplea LEACHN en el cálculo de la conductividad hidráulica para cada valor de contenido de humedad procede, al igual que la de retención anteriormente descrita, de Campbell (1974), y tiene la siguiente forma:

$$K(\theta) = K_s(\theta/\theta_s)^{2b+3}$$

donde

$K_s$  es la conductividad hidráulica en saturación (mm/d)

$b$  es la constante obtenida de la curva de retención

En la figura 4.2 se han representado las curvas de conductividades hidráulicas consideradas para SWATRE y las calculadas por LEACHN a efectos de su comparación.

Como se observa, las dos curvas obtenidas para la capa 3 son muy similares. Para las capas 1 y 2 el ajuste es bueno tan sólo para contenidos de humedad superiores a 0.2. Dado que, según los resultados de SWATRE, estas capas tienen siempre un contenido de humedad superior a este valor para los períodos en que se ha simulado el transporte de especies nitrogenadas, se considera que estos ajustes son lo suficientemente representativos de las características de las capas.

Los valores de permeabilidad en saturación introducidos son los mismos que se consideraron en la modelización del flujo para los materiales tipo supuestos. Estos son:

CAPA 1:  $K_s = 50$  mm/d

CAPA 2:  $K_s = 23$  mm/d

CAPA 3:  $K_s = 3000$  mm/d

#### **4.3. Condiciones iniciales**

Para el presente estudio se han simulado dos períodos, de un mes de duración cada uno, bastante diferentes entre sí.

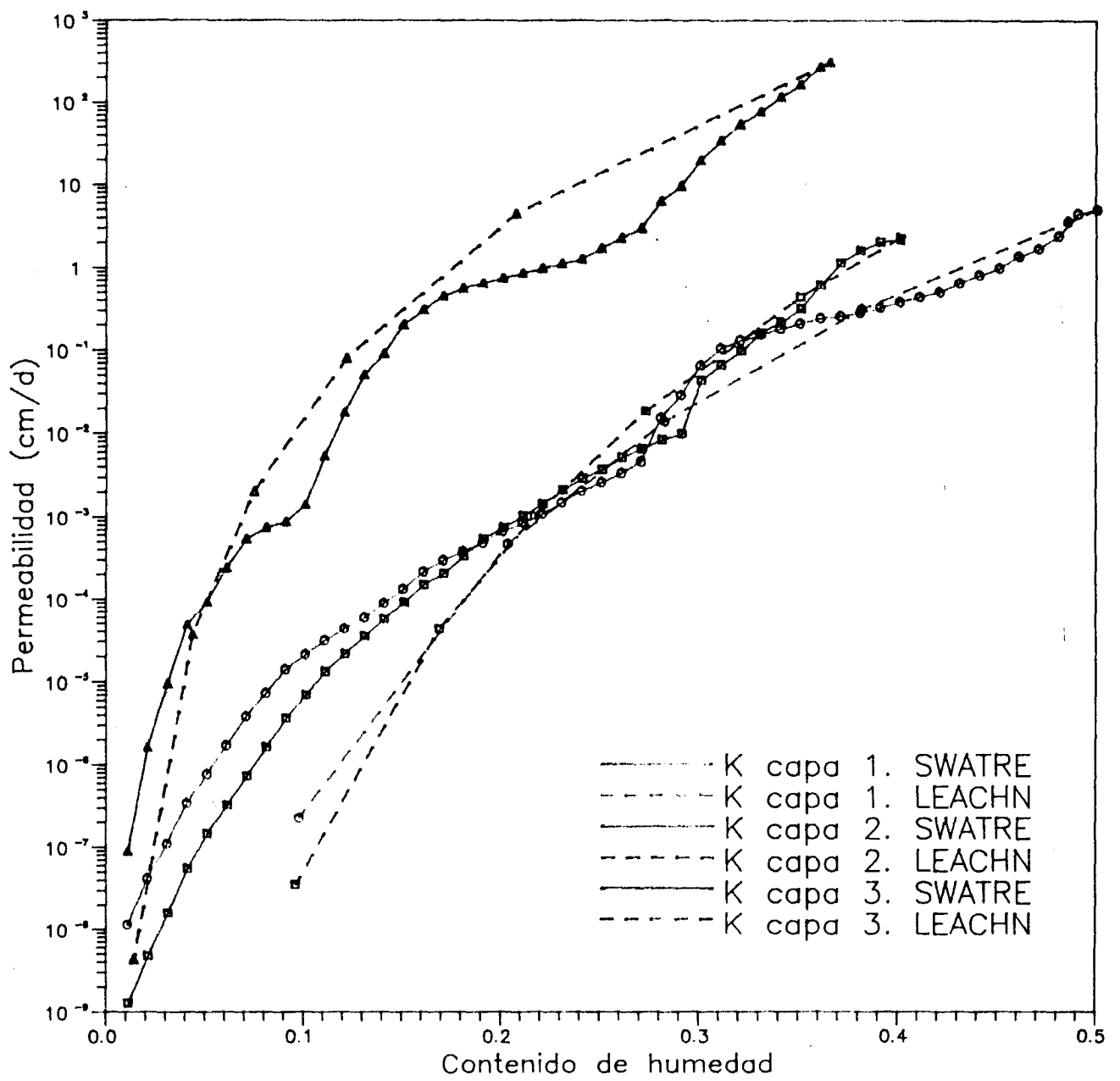


Fig. 4.2.- Comparación de las permeabilidades utilizadas en la simulación de flujo (SWATRE) y transporte (LEACHN)

En primer lugar, se ha intentado reproducir la evolución espacio-temporal de los compuestos de nitrógeno durante el mes de junio. Durante este período, en la parcela experimental E-2 no existía ningún cultivo en desarrollo hasta el día 13 de junio en que se sembró maíz en toda la zona. No obstante, el maíz sembrado en el interior de la parcela experimental E-2 se perdió, por lo que hubo de ser replantado más tarde.

Por tanto, durante el período existente entre el 30 de mayo y el 28 de junio de 1989 se ha considerado que no existía en esta zona ninguna planta cuyas funciones, tanto de extracción de agua como de especies nitrogenadas, afectasen a la distribución de contenidos de humedad y concentraciones en el perfil.

El motivo de la elección de las fechas antes mencionadas para comienzo y fin de esta primera modelización es que fue en esos días cuando se realizaron los muestreos que, con periodicidad mensual, se hacen en las parcelas instaladas.

Sobre este punto debe hacerse una precisión, y es el hecho de que el muestreo se realizase en esas fechas no indica, en absoluto, que los resultados de los análisis representan la concentración de cada especie en el perfil en aquel momento, dado que los tomamuestras de succión recogen el agua del terreno durante todo el mes. Por tanto, las concentraciones obtenidas deben ser una "mezcla" del agua que realmente está presente a lo largo de un mes, en proporciones muy variables puesto que depende del estado de humedad del terreno cada día.

Este punto es fundamental para una correcta interpretación de los resultados de las simulaciones que se presentan más adelante, dado que a falta de perfiles diarios de concentración se han utilizado los resultados de estos muestreos como representativos de los días en cuestión.

Por otra parte, la segunda simulación abarca el período de tiempo entre los muestreos realizados los días 5 de septiembre y 5 de octubre. Durante este período se ha considerado la existencia de maíz en la parcela, por lo que, a diferencia del caso anterior, se produjo tanto transpiración como extracción de especies nitrogenadas por el cultivo.

En ambos casos se ha considerado como condición inicial, el perfil de humedad obtenido de la simulación de flujo mediante el programa SWATRE. En las figuras 4.3 y 4.4 se presentan los perfiles correspondientes a los días 30 de mayo y 5 de septiembre.

Respecto a las concentraciones iniciales de amonio y nitrato en el perfil, se han incluido en las figuras 4.5 y 4.6.

#### **4.4. Condiciones de borde**

##### **4.4.1. Condición de borde en el techo del sistema**

El techo del sistema tiene, durante los períodos considerados, condiciones de presión y concentración variables debido a las entradas de agua en concepto de lluvias y

riegos con diferentes concentraciones de especies nitrogenadas. Los valores introducidos para la simulación del 30-5-89 al 28-6-89 aparecen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1

Lluvias, riegos y concentraciones de especies nitrogenadas para la simulación del 30-5-89 al 28-6-89.

Día	Lluvia/Riego	Cantidad (mm)	Amonio (mg/l)	Nitrato (mg/l)
30 - 5 - 89	L	0.7	0.0*	9.08
31 - 5 - 89	L	2.3	0.0*	9.08
1 - 6 - 89	L	0.6	0.0*	9.08
2 - 6 - 89	L	5.5	0.0*	9.08
13 - 6 - 89	R	23.0	0.1	21.1
14 - 6 - 89	L	1.7	0.0*	9.08
17 - 6 - 89	L	0.6	0.0*	9.08
19 - 6 - 89	L	1.0	0.0*	9.08
21 - 6 - 89	R	23.0	0.1	21.1
25 - 6 - 89	R	23.0	0.1	21.1

\* El amonio no fue analizado en la muestra de agua de lluvia

El análisis del agua de lluvia se realizó en una muestra correspondiente al episodio del 30-5-89. Por otra parte, el del agua de riego corresponde al que se efectuó el 5-5-89. Estos valores se han generalizado para todas las lluvias y riegos que se efectuaron en el período simulado.

Igualmente, para la simulación de 5-9-89 a 5-10-89 se han utilizado los valores de la tabla 4.2.

Tabla 4.2

Lluvias, riegos y concentraciones de especies nitrogenadas para la simulación del 5-9-89 al 5-10-89.

Día	Lluvia/Riego	Cantidad (mm)	Amonio (mg/l)	Nitrato (mg/l)
6 - 9 - 89	R	46.1	0.05	41.4
7 - 9 - 89	L	31.9	0.0*	6.2
8 - 9 - 89	L	5.0	0.0*	6.2
10 - 9 - 89	L	1.2	0.0*	6.2
18 - 9 - 89	R	25.9	0.05	41.4
21 - 9 - 89	R	37.4	0.05	41.4
27 - 9 - 89	R	41.2	0.05	41.4

\* El amonio no fue analizado en la muestra de agua de lluvia

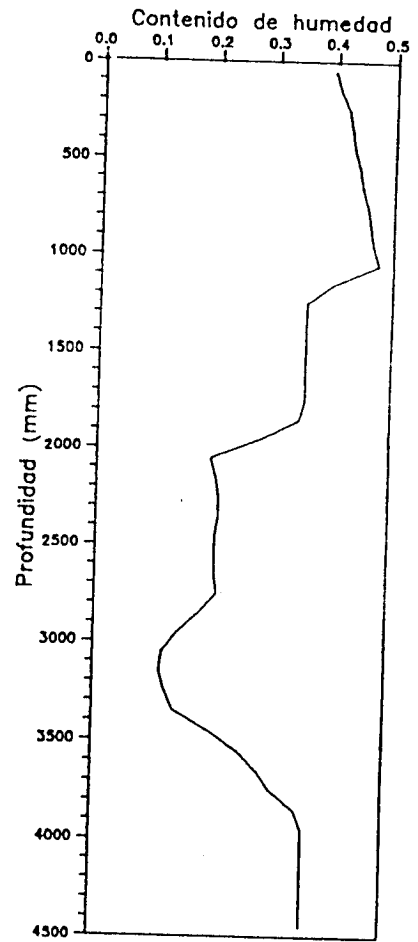
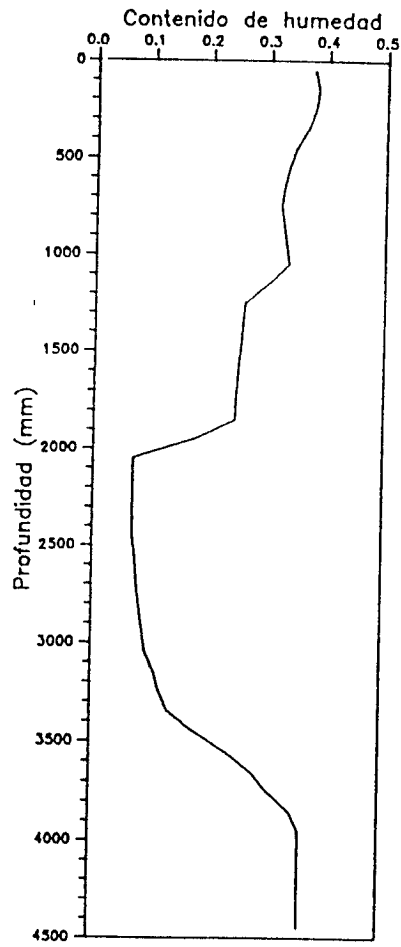


Fig. 4.3.- Perfil de humedad (30/5/89)

Fig. 4.4.- Perfil de humedad (5/9/89)



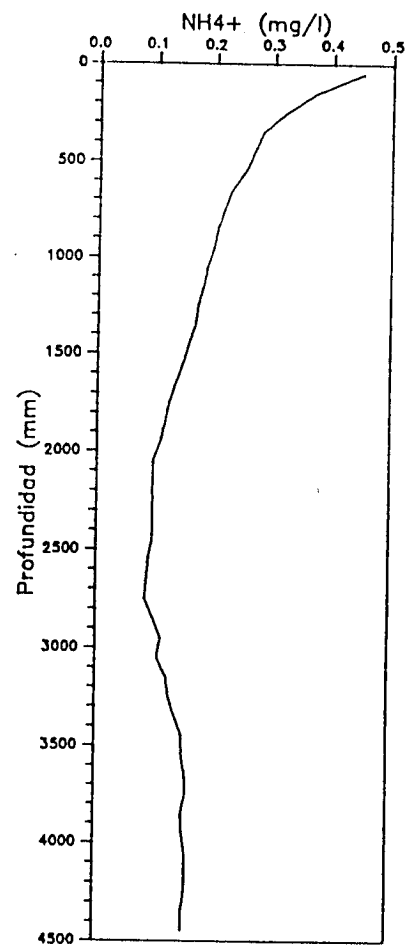
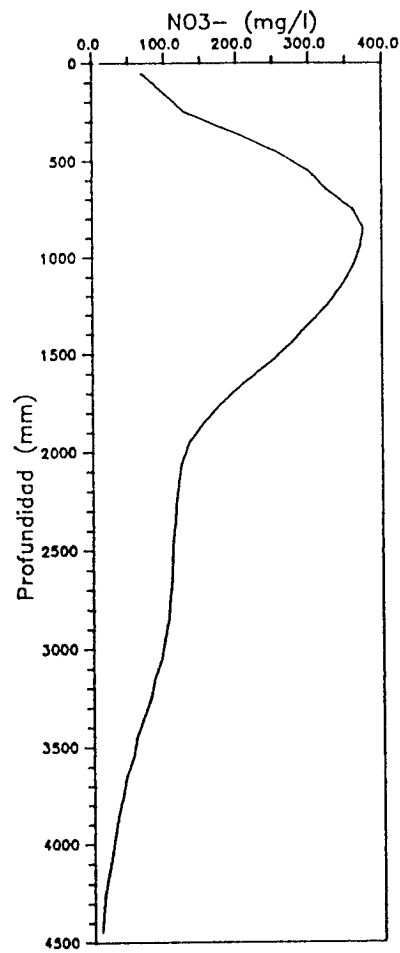


Fig. 4.5.- Perfiles de nitrato y amonio (30/5/89)

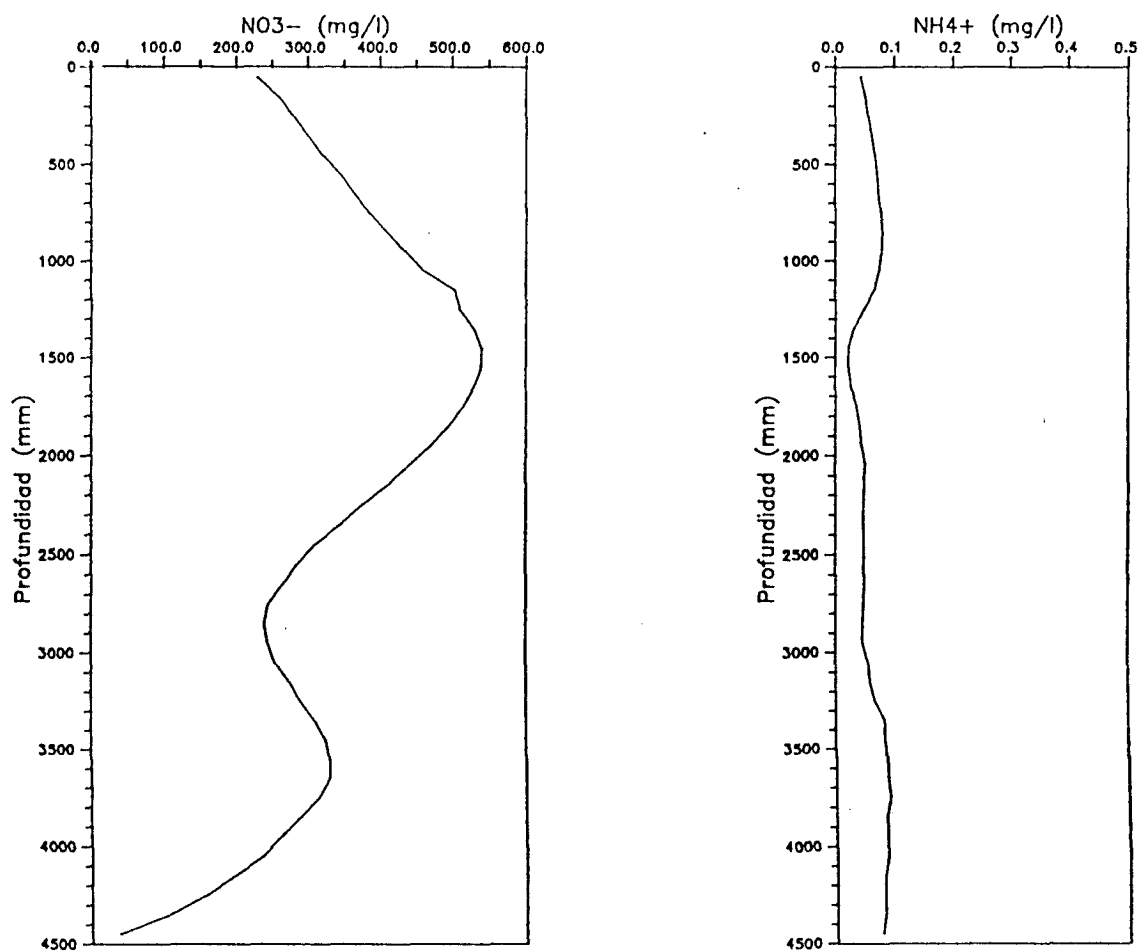


Fig. 4.6.- Perfiles de nitrato y amonio (5/9/89)

El análisis del agua de lluvia se realizó en la muestra tomada el 5-9-89. Asimismo, el análisis de agua de riego corresponde al día 18-9-89. Estos datos han debido ser extrapolados a todos los episodios de lluvia o riegos a falta de datos específicos de todos ellos. Durante este período no se realizó abonado.

Por otra parte, los valores de transpiración y evaporación han sido adaptados de los obtenidos en la simulación de flujo con el modelo SWATRE, a fin de no alterar las condiciones de flujo obtenidas.

#### 4.4.2. Condición de borde en el fondo del sistema

El modelo LEACHN permite, como se comentó en el apartado 3.6, el establecimiento de un nivel freático de profundidad variable. Los valores de profundidad deben ser entradas para cada semana, aunque el modelo realiza una interpolación lineal entre cada dos valores para obtener los niveles diarios.

En la tabla 4.3 se han recogido los valores introducidos al modelo para cada semana de los dos períodos considerados. Como se observa, las diferencias entre los valores semanales son suficientemente pequeños para aceptar como válida la interpolación diaria.

Tabla 4.3

Profundidad del agua subterránea en los períodos de simulación			
Período Junio 1989		Período Septiembre 1989	
Semana	Prof. nivel (cm)	Semana	Prof. nivel (cm)
1	392	1	384
2	398	2	373
3	394	3	376
4	400	4	377
5	405	5	382

## 5. RESULTADOS

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Período de junio de 1989

Esta primera simulación cubrió el período de tiempo existente entre el 30 de mayo y el 28 de junio de 1989, fechas éstas en las que se realizaron los muestreos periódicos.

Durante este período, como se ha comentado anteriormente, no hubo plantas en la parcela E-2, por lo que la simulación del transporte tiene en cuenta sólo los procesos de advección, dispersión y transformación de las especies.

Los parámetros más importantes introducidos fueron:

- Dispersidad: 40 mm
- Tasa de nitrificación: 0.012/día
- Tasa de desnitrificación: 0.0012/día

Por otra parte, el día 8 de junio de 1989 se realizó un abonado de fondo en toda la zona. Este abonado, de 259 kg/ha de un compuesto de nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones 8-15-15, supuso la incorporación de 302 mg/m<sup>2</sup> de nitrógeno en forma de amonio y 923 mg/m<sup>2</sup> en forma de nitrato.

Como condición inicial para la simulación se definió el perfil de humedad resultante de la modelización del flujo. Este perfil, correspondiente al 30 de mayo de 1989, se presentó en la figura 4.6. Igualmente, en la figura 4.8 se representaron los perfiles iniciales de concentración de nitrato y amonio, respectivamente, resultantes de los análisis de las muestras tomadas ese día.

Debe mencionarse que, a efectos del modelo, los perfiles iniciales deben introducirse en unidades de mg/kg de suelo seco. La utilización de estas unidades (que se obtienen a partir de las concentraciones en mg/l, la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo) permite realizar balances de masa de las especies nitrogenadas.

El resultado al final de esta simulación se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el periodo de junio de 1989

	Agua (mm)	Amonio-N (mg/m <sup>2</sup> )	Nitrato-N (mg/m <sup>2</sup> )
Contenido inicial	1147.9	203.8	173550.1
Contenido final	1148.3	401.7	170107.5
Escorrentía	0.0	0.0	0.0
Cambio	0.4	197.9	- 3442.6
Entradas:			
- Lluvia o riego	81.4	6.8	1568.8
- Abonado		302.0	923.0
Salidas:			
- Drenaje	- 9.8	- 5.8	- 130.5
- Evap/Volat/Convers	99.0	2.0	0.0
- Transformación		114.7	6179.5
- Extracc.plantas	0.0	0.0	0.0
Error	- 8.2	0.0	0.1

Como se observa, la masa total de nitrógeno en forma de nitrato disminuye durante el período simulado, debido fundamentalmente a los procesos de transformación, que superan a las entradas en concepto de riego, abonado y entradas por ascenso desde el nivel saturado, que durante este período sufrió dos ascensos.

Por otra parte, los resultados referentes al amonio, deben tomarse con reservas dado que los valores de partida,

cuyo perfil se ha presentado anteriormente parecen encontrarse dentro de los límites de detección y no representan bien las condiciones "in situ".

La evolución temporal del perfil de concentración de nitratos, único elemento válido para la calibración de estas simulaciones, se presenta en la figura 5.1, en la que se han representado además de los perfiles inicial y final, los obtenidos para unos días intermedios.<sup>1</sup>

Como se desprende de esta figura, la forma del perfil apenas varía durante el período simulado, indicando que, frente a la masa total de nitrógeno existente, las entradas y salidas son pequeñas y que, pese a que no están equilibradas, no llegan a alterar de forma significativa el perfil inicial de concentraciones.

Respecto a esta evolución, hay que resaltar dos hechos importantes. Se produce un aumento de la concentración en la parte superior del perfil como consecuencia de los riegos y abonados que se realizan. Por otro lado, el pico de concentración que inicialmente se localiza a unos 0.9 m de profundidad, desciende ligeramente, tanto de valor como de profundidad con el tiempo, hasta 1 m. El perfil real del 28 de junio también refleja este hecho aunque con contenidos algo más bajos.

Conviene recordar aquí que los resultados del modelo SWATRE para este período indicaban que los flujos durante el mes de junio tienen lugar principalmente en el metro más

---

<sup>1</sup> En esta figura y las siguientes, R representa valores reales de campo, mientras que C son los valores calculados.

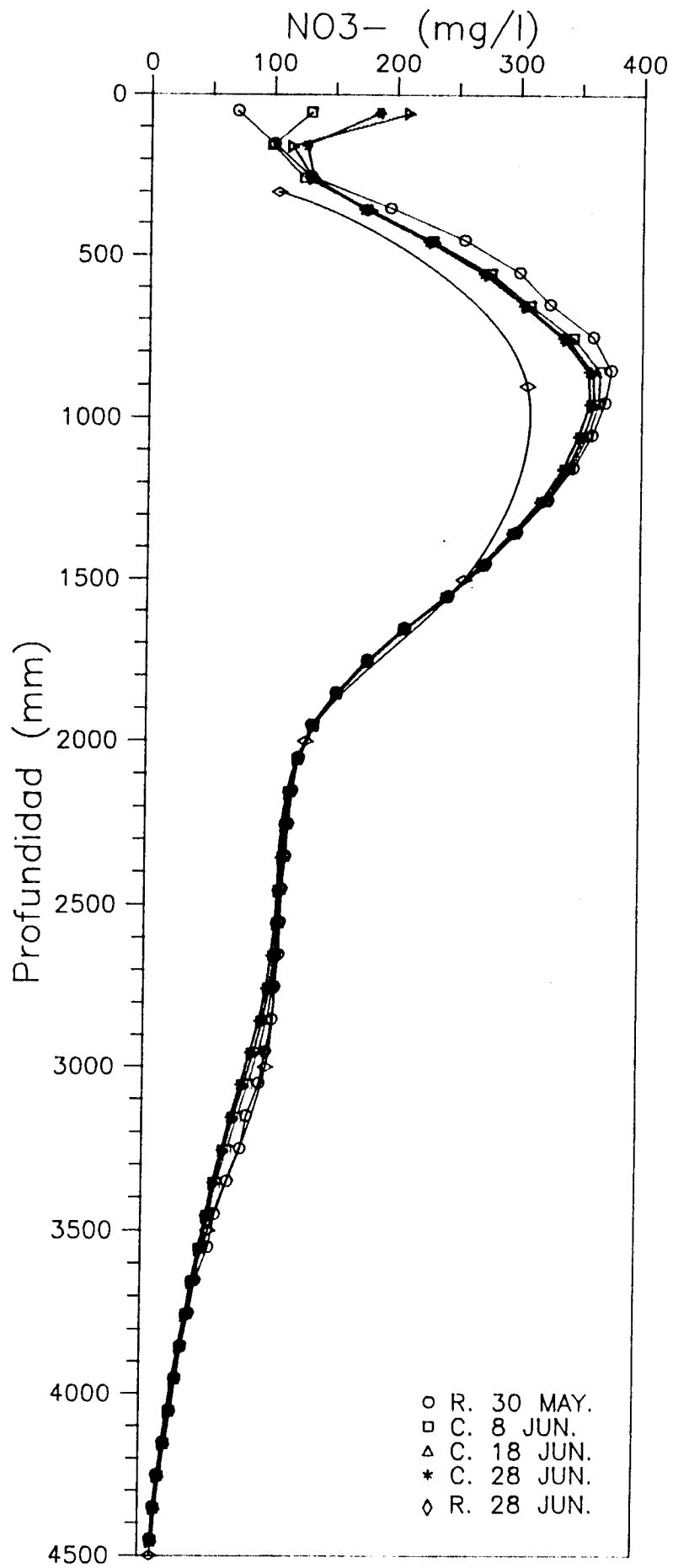


Fig. 5.1.- Perfiles reales y calculados en la simulación



superior del perfil debido a las lluvias y riegos, mientras que en profundidad el agua apenas se mueve. Por tanto, y al no existir extracciones por plantas, es lógico suponer que los perfiles de concentración no se alteran en exceso respecto a su configuración original.

#### **5.2. Periodo de septiembre de 1989**

La simulación del período comprendido entre el 5 de septiembre y el 5 de octubre 1989 es, a priori, más representativa de todos los procesos que actúan en la zona no saturada en la zona de estudio. Aparte de los procesos incluidos en la simulación del mes de junio, en este momento hay que tener en cuenta la presencia del maíz que, completamente desarrollado, ejerce una acción importante tanto en el flujo del agua como en el transporte y evolución de los compuestos nitrogenados.

En este caso, a diferencia de la simulación presentada anteriormente, existe una notable diferencia entre los perfiles de concentración y humedad al comienzo y al final del período considerado. Las diferencias en humedad son la respuesta del sistema a la lluvia, riegos y presencia de las plantas, y ya fueron comentadas en la simulación del flujo para el período julio-noviembre. Sin embargo, las variaciones en los perfiles de concentración responden a variables más complejas, y menos conocidas en nuestro caso, como son los coeficientes de dispersión, difusión, tasas de transformación entre las especies, etc.

Por esta razón, y con el objetivo de reproducir tales variaciones, se han variado los parámetros menos conocidos durante el proceso de calibración, evaluando los efectos que cada uno de ellos ejerce en la distribución de las especies nitrogenadas.

El perfil inicial de contenido volumétrico de humedad introducido al modelo se presentó en la figura 4.7 y procede de la simulación previa realizada con SWATRE. Por otra parte, las concentraciones de los iones nitrato y amonio se representaron en la figura 4.9.

Respecto a los datos de la profundidad de las raíces del maíz, se ha considerado que éstos tienen una longitud constante de 130 cm durante el período, modelado y están homogéneamente distribuidos en profundidad.

El coeficiente de difusión efectiva se ha tomado, de acuerdo con la bibliografía consultada, variable con el contenido de humedad,  $\theta$ , según la expresión:

$$D(\theta) = D_{ol} \cdot \alpha \cdot e^{(b \cdot \theta)}$$

donde  $\alpha$  y  $b$  son constantes de valor  $0.1 \times 10^{-2}$  y 10, respectivamente y  $D_{ol}$  es el coeficiente de difusión en fase líquida, con un valor de  $120 \text{ mm}^2/\text{d}$ .

La primera aproximación a la sensibilidad de los distintos parámetros se ha llevado a cabo variando la dispersividad. Para ello, se han comparado los resultados obtenidos para valores de 16, 40, 100 y, de forma extrema 4000 mm.

Inicialmente se ha utilizado una tasa de nitrificación de  $0.012 \text{ día}^{-1}$  para los primeros 120 cm de perfil y la mitad,  $0.006$ , para el resto del perfil, donde no hay raíces. La tasa de desnitrificación se ha fijado en  $0.0012 \text{ día}^{-1}$  para la misma parte superior, y  $0.0001$  para la parte más profunda.

No se ha observado ninguna variación significativa entre los resultados para 16, 40 y 100 mm. Estos valores parecen ser, de acuerdo, con la bibliografía consultada, los que pueden indicar el orden de magnitud de esta variable para nuestro caso y el tipo de discretización realizada.

En la figura 5.2 se presenta la evolución del perfil de concentración de nitratos para distintas fechas con una dispersividad de 40 mm. Se incluye la curva de concentración real resultante del análisis de las muestras tomadas el 5-10-89, curva ésta que debería obtenerse de la simulación.

Como se observa, la curva inicial de concentración se desplaza en profundidad con el tiempo, de tal manera que el máximo localizado inicialmente a 1.5 m de profundidad progresa, atenuándose hasta unos 2-2.5 m. En general se produce un suavizado de la curva. En la zona más superficial del perfil (0.3 m) los contenidos de nitrato disminuyen progresivamente desde unos 300 mg/l hasta unos 150 mg/l.

El balance obtenido para esta simulación aparece en la tabla 5.2

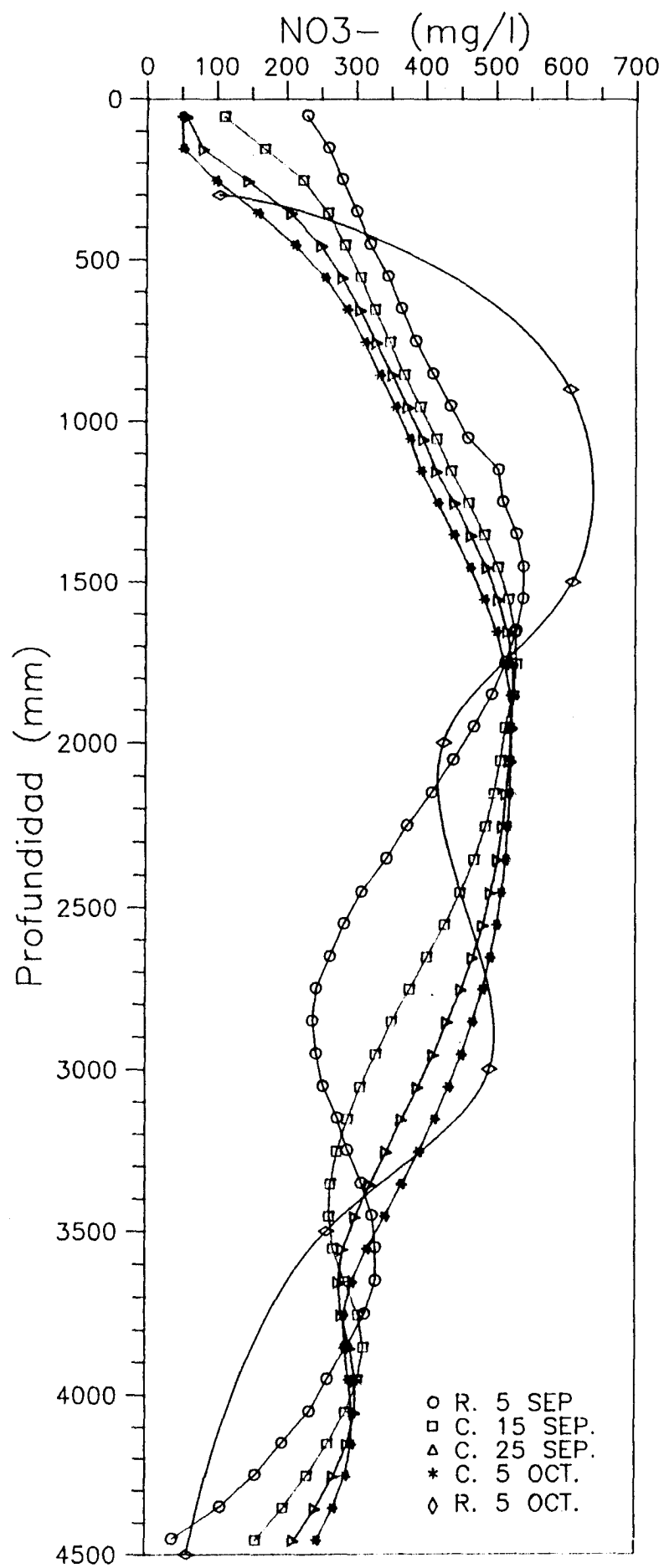


Fig. 5.2.- Perfiles reales y calculados en la simulación

Tabla 5.2

Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el período de septiembre de 1989 (dispersividad de 40 mm)

	Agua (mm)	Amonio-N (mg/m <sup>2</sup> )	Nitrato-N (mg/m <sup>2</sup> )
Contenido inicial	1402.8	88.5	488060.4
Contenido final	1304.8	71.8	447308.7
Escurrentía	33.5		
Cambio	- 97.9	- 16.7	- 40751.8
Entradas:			
- Lluvia o riego	155.2	5.7	5085.2
- Abonado			
Salidas:			
- Drenaje	186.5	0.9	29380.4
- Evap/Volat/Convers	37.2	0.0	0.0
- Transformación		20.8	6347.1
- Extracc.plantas	35.2	0.6	10130.2
Error	- 5.7	0.0	0.0

Como se observa, en el período considerado se ha obtenido una pérdida total de nitrato superior a 40 g por metro cuadrado para el perfil modelado, que se debe a las salidas por drenaje en el fondo del sistema, transformación y extracción por las raíces de las plantas. Estas salidas no llegan a compensarse con las entradas por lluvias o riegos.

A fin de que la interpretación de los balances sea más completa, se ha calculado la masa de nitrato y amonio que resulta de los perfiles de concentración de campo correspondientes al final del período (5-10-89) con los contenidos de humedad supuestos en aquella fecha. Este cálculo ha arrojado unos valores de 59.1 y 465380.6 mg/m<sup>2</sup> para amonio y nitrato, respectivamente.

En lo que se refiere a los nitratos se observa que, aparte de que la distribución de concentraciones calculadas difiere de la medida, se ha calculado una pérdida de nitratos

superior a la que debería haberse producido. Sobre la interpretación de este tipo de balance se volverá a hacer énfasis al final de este apartado.

Por otra parte, a fin de observar los efectos que ejerce en el sistema un valor muy elevado de dispersividad, en la figura 5.3 se ha representado la distribución resultante para un valor de dispersividad de 4000 mm.

Como se observa, el perfil tiende, ya a los diez días del comienzo de la simulación, a la homogeneización total, hasta estabilizarse en valores del orden de 300 mg/l en todo el perfil.

En consecuencia, con estos resultados se ha decidido adoptar como válidas dispersividades del orden de 40-100 mm.

Una vez establecido el orden de magnitud de la dispersividad y la escasa sensibilidad del sistema a su variación, dentro del margen elegido, se han variado las tasas de nitrificación y desnitrificación con el fin de ver si la modelización del sistema reproduce más fielmente los datos observados.

En un primer intento, se duplicaron los valores introducidos anteriormente, de tal manera que para la zona de raíces (1.3 m superiores) fueron de  $0.024 \text{ día}^{-1}$  y  $0.0024 \text{ día}^{-1}$  para nitrificación y desnitrificación, respectivamente, y 0.012 y 0.0012 para el resto del perfil.

Este cambio no ha supuesto, a efectos de la distribución del perfil de nitratos en el tiempo, ninguna variación

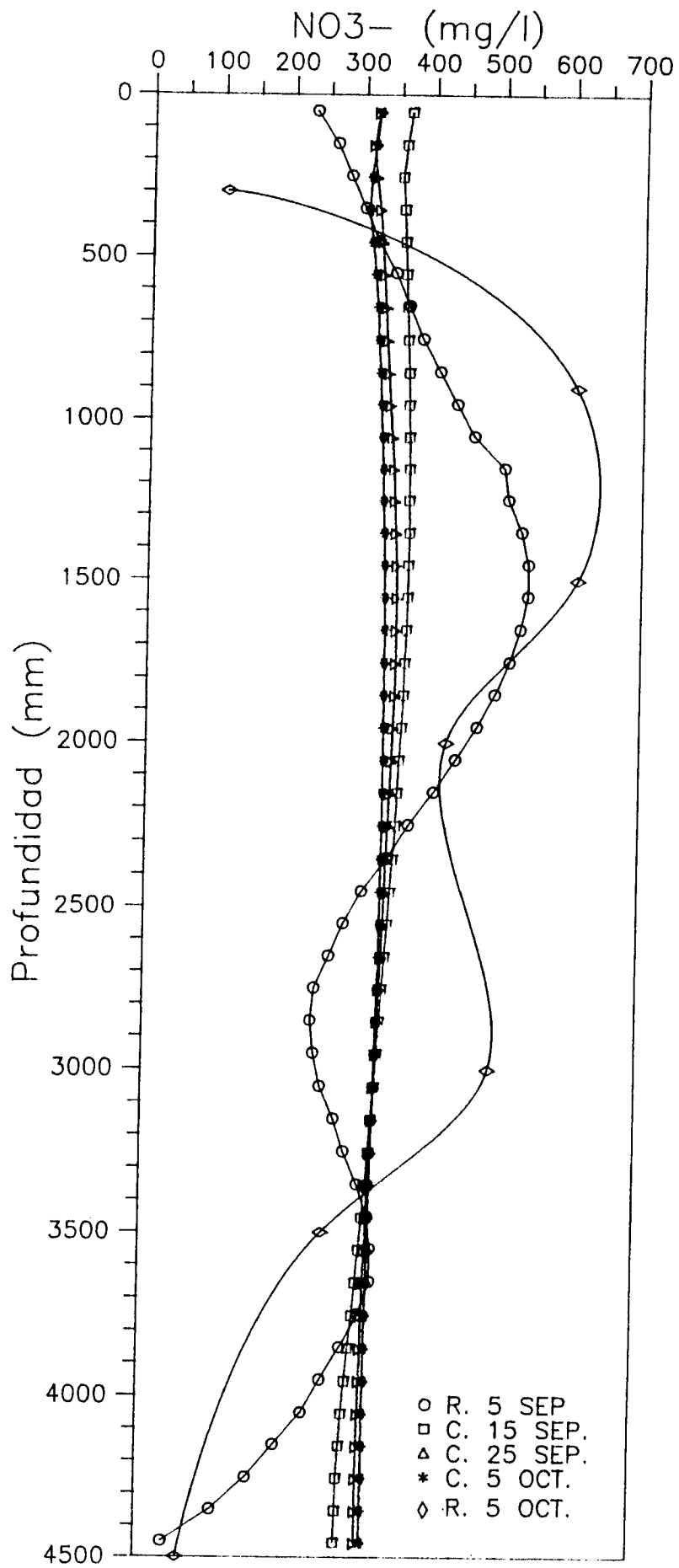


Fig. 5.3.- Perfiles reales y calculados en la simulación

sustancial respecto a la comentada anteriormente con una dispersividad del orden de 40 mm, por lo que se omite la representación del resultado.

No ocurre lo mismo si los valores anteriores son aumentados en un orden de magnitud. Es decir:

	Tasa de nitrificación	Tasa de desnitrificación
Zona de raíces	0.24 día <sup>-1</sup>	0.024 día <sup>-1</sup>
Zona profunda	0.12 día <sup>-1</sup>	0.012 día <sup>-1</sup>

La evolución del perfil de nitratos obtenido se presenta en la figura 5.4. Como se observa, hay una notable pérdida de nitratos con el tiempo debida fundamentalmente a que aumenta de forma espectacular la transformación de nitratos a productos de desnitrificación y este proceso no es contrarrestado por la transformación de amonio, que está presente en cantidades mucho menores, a nitrato.

Este efecto es más notable en la parte más superior del perfil, donde se han impuesto unas tasas más altas que en la parte profunda.

Igualmente, se observa que se produce un desplazamiento y un suavizado de los dos picos iniciales de concentración (a 1.5 y 3.5 m de profundidad), que avanzan, aproximadamente, unos 75 cm durante el período considerado.

Si, por el contrario, se consideran tasas de nitrificación y desnitrificación un orden de magnitud inferiores a las consideradas inicialmente, los valores serían:

	Tasa de nitrificación	Tasa de desnitrificación
Zona de raíces	$2.4 \times 10^{-3}$ día <sup>-1</sup>	$2.4 \times 10^{-4}$ día <sup>-1</sup>
Zona profunda	$1.2 \times 10^{-3}$ día <sup>-1</sup>	$1.2 \times 10^{-4}$ día <sup>-1</sup>



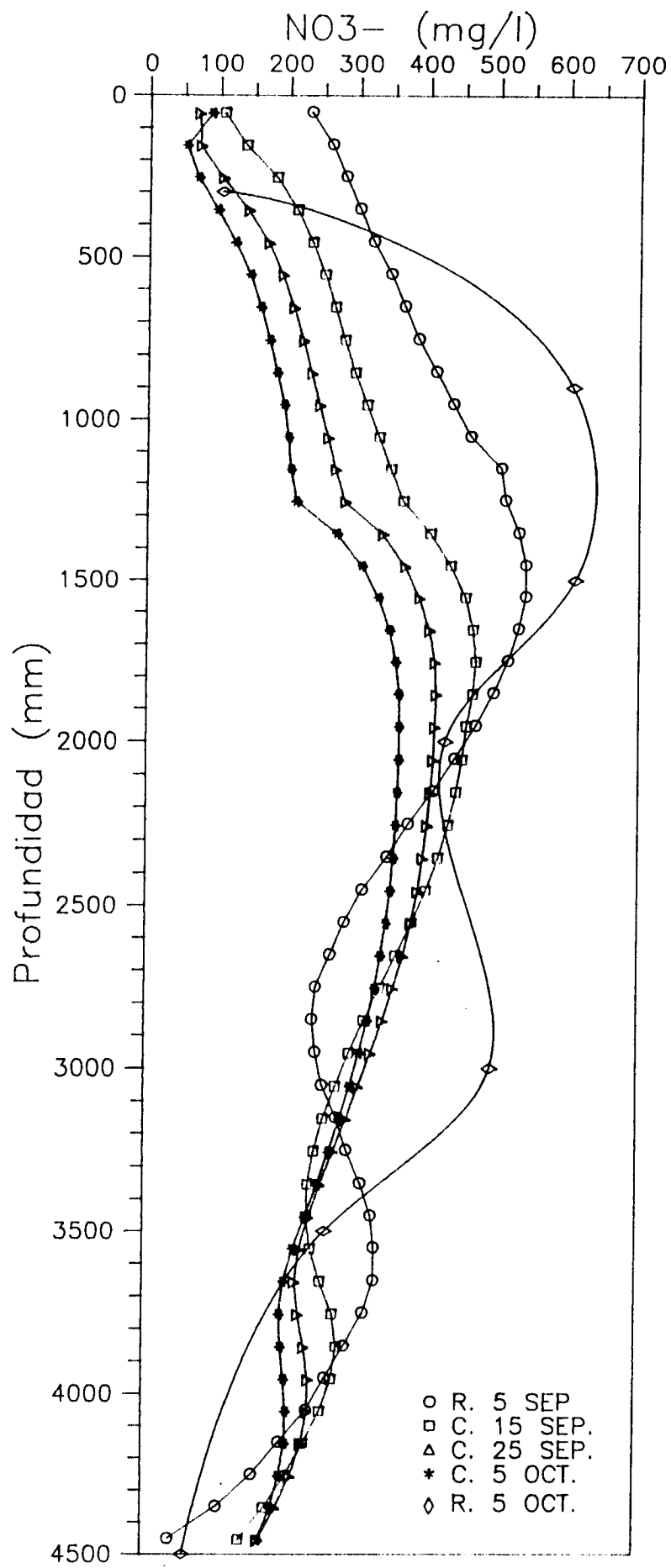


Fig. 5.4.- Perfiles reales y calculados en la simulación

En este caso la evolución de los perfiles de concentración de nitrato apenas si difieren de los resultados obtenidos en la primera simulación presentada en este apartado (figura 5.2). Tan sólo es de destacar que, lógicamente, las cantidades de nitrógeno afectadas por transformación de nitrato a productos de desnitrificación se reduce, aproximadamente, a un tercio de los producidos entonces. Este proceso es más importante en la zona superficial del perfil, debido a la presencia de las raíces del maíz.

Como se comentó anteriormente, a partir de los datos de concentración de nitrato al comienzo y al final del período simulado y los contenidos de humedad respectivos, se ha calculado que la masa total de nitrato debe pasar de unos 488 g/m<sup>2</sup> a unos 465 g/m<sup>2</sup> debido a que, pese a que las concentraciones son mayores el 5 de octubre, el contenido de humedad en el perfil es menor en ese momento.

No obstante, en las simulaciones realizadas se han obtenido siempre cantidades inferiores a esos 465 g/m<sup>2</sup>. Para explicar este fenómeno hay tres razones posibles:

- a) Pasa al nivel freático más cantidad de nitrato en el sistema modelado que en la realidad
- b) Entra más nitrógeno en la realidad del que se ha considerado en la modelización
- c) Ambas cosas

El punto a) puede ser razonado puesto que los picos de concentración calculados parece que descienden más rápidamente que lo que se desprende de las curvas de campo. No obstante, la simulación de flujo realizada por LEACHN

ha resultado siempre muy similar a la que se obtuvo con el modelo de flujo SWATRE, como se verá más adelante. Por ello, la parte advectiva de la ecuación de transporte es de suponer que esté adecuadamente representada. En cuanto a la parte dispersiva, se ha visto que la variación de la dispersividad dentro de los márgenes establecidos no afecta tampoco a las distribuciones calculadas.

Por estas razones, y considerando la posibilidad b) de que entre al sistema más cantidad de nitrógeno del que se ha supuesto en la modelización, se han realizado varias pasadas al modelo simulando fuentes adicionales de este elemento. Ello se ha realizado suponiendo que, tanto en el perfil inicial del suelo como en el agua de riego, existe una cierta cantidad de urea cuya transformación puede originar aumento en la concentración de amonio y nitrato.

En una primera aproximación, se ha considerado la presencia de 30 mg/kg en los 50 m más superficiales del suelo y que en cada episodio de riego se incorporan 50 mg/l de esta especie.

Otros parámetros considerados en esta simulación fueron:

- Dispersividad: 40 mm
- Tasas de transformación

	Hidrólisis de urea	Nitrificación	Desnitrificación
Zona de raíces	0.16 día <sup>-1</sup>	0.012 día <sup>-1</sup>	0.0012 día <sup>-1</sup>
Zona profunda	0.16 día <sup>-1</sup>	0.006 día <sup>-1</sup>	0.0001 día <sup>-1</sup>

Los resultados de esta simulación en lo referente a la evolución calculada del perfil de nitratos son prácticamente idénticos a los que se presentaron en la figura 5.2, por lo que se omite su representación.

El balance obtenido para esta simulación figura en la tabla 5.3.

Tabla 5.3

Balances de agua y especies nitrogenadas obtenidos por LEACHN en el período de septiembre de 1989 considerando presencia de urea.

	Agua (mm)	Urea-N (mg/m <sup>2</sup> )	Amonio-N (mg/m <sup>2</sup> )	Nitrato-N (mg/m <sup>2</sup> )
Contenido inicial	1402.8	19875.0	88.5	488060.4
Contenido final	1304.8	788.8	18730.6	453459.7
Escorrentía	33.5			
Cambio	- 97.9	-	18642.1	- 34600.8
Entradas:		19086.2		
- Lluvia o riego	155.2		1.2	5085.2
- Abonado		5856.2	0.0	0.0
Salidas:		0.0		
- Drenaje	186.5		0.9	29380.4
- Evap/Volat/Convers	37.2	0.0	31.0	0.0
- Transformación		0.0	5768.7	6443.6
- Extracc.plantas	35.2	24942.0	500.4	9630.4
Error	- 5.7	0.0	0.1	0.2
		0.5		

Como se observa, prácticamente todo el contenido de urea se transforma a amonio por hidrólisis, pero éste no llega a transformarse a nitrato por lo que la curva de esta especie no varía respecto a la que se presentó en la figura 5.2.

Resultados muy similares se han obtenido con contenidos iniciales de urea en el suelo de hasta 100 mg/kg en toda la capa superior (110 cm), por lo que, de existir urea tanto en el suelo como en el agua de riego, parece necesaria una estimación precisa de las tasas de transformación entre las especies nitrogenadas para que el amonio generado por

hidrólisis de la urea pase a nitrato y se obtenga un perfil de concentración más similar al de campo de 5 de octubre de 1989.

Por último, se ha realizado una pasada del modelo en la que, descartando que se aporte urea en las aguas de lluvia y riego así como su presencia en el perfil inicial del suelo, se ha simulado para este período la evolución de un soluto conservativo. Es decir, que no está sujeto a procesos de transformación como las especies nitrogenadas y, por tanto, debe presentar unas distribuciones de concentración que sean respuesta a los procesos advectivo y dispersivo únicamente.

Para ello, se ha elegido el cloruro, al ser éste un ion que debe cumplir los requisitos mencionados anteriormente y además no es extraído por las plantas y tan sólo debe ser afectado por su precipitación, lo que no debe ocurrir en nuestro caso.

Para este caso se tomaron las tasas de transformación que se han descrito en el último caso, y una dispersividad de 100 mm.

Los resultados de esta simulación no varían, en lo que se refiere a la distribución de nitratos a lo largo del tiempo, de los ya presentados anteriormente, pese a que se aumentó ligeramente la proporción de agua extraída por las plantas frente a la evaporación.

El balance obtenido aparece en la tabla 5.4.

Tabla 5.4

Balances de agua, especies nitrogenadas y cloruros obtenidos por LEACHN en el periodo de septiembre de 1989

	Agua (mm)	Amonio-N (mg/m <sup>2</sup> )	Nitrato-N (mg/m <sup>2</sup> )	Cloruros (mg/m <sup>2</sup> )
Contenido inicial	1402.8	88.5	488060.4	560153.4
Contenido final	1310.0	57.6	442967.1	538296.2
Escorrentía	34.8			
Cambio	- 92.8	- 30.9	- 45093.3	- 21857.2
Entradas:				
- Lluvia o riego	153.9	5.0	5030.6	14485.0
- Abonado				
Salidas:				
- Drenaje	195.8	14.8	33738.3	36341.9
- Evap/Volat/Convers	13.1	0.2	0.0	0.0
- Transformación		18.0	6275.6	0.0
- Extracc.plantas	43.6	2.9	10128.0	0.0
Error	- 5.8	0.0	0.0	0.3

Como se puede comprobar este balance es muy similar al primero que se presentó en lo referente a los volúmenes de agua y las masas de amonio y nitratos implicados.

La evolución del contenido de nitratos (figura 5.5) igualmente es la ya conocida de casos anteriores. Por otro lado, de la comparación de los contenidos de cloruros reales y calculados por el modelo (figura 5.6) se pueden obtener las siguientes conclusiones:

La curva inicial de distribución de cloruros con la profundidad parece indicar la existencia de dos "picos" de concentración a las profundidades de muestreo de 0.9 y 2 m. Estos picos, que casualmente y de forma aproximada coinciden con las profundidades a las que se localizan los cambios de litología supuestos, sufren un desplazamiento

en la curva calculada de tal modo que el más superficial desciende a una profundidad de 1.3 m mientras que el segundo se manifiesta a unos 3.5 m.

El hecho de que el más profundo haya descendido más en el mismo período de tiempo es debido a que la conductividad hidráulica de la tercera capa, y por tanto el flujo asociado a ella, es mayor que la de las dos capas superiores pese a que su contenido de humedad es siempre menor (ver apartado 2.4.4., Parte II), lo que genera un mayor flujo advectivo.

En la curva de campo correspondiente al 5 de octubre también parece observarse un descenso de la profundidad de los dos picos mencionados y una reducción en los valores absolutos, no obstante el ajuste con los perfiles calculados no puede considerarse aceptable.

La explicación para este resultado en ausencia de fenómenos químicos o biológicos puesto que el ion es conservativo, debe hallarse en las características físicas de las capas (curvas de retención y de conductividad hidráulica), o bien en algún método que permita eliminar cloruros con mayor facilidad en el medio real que en el modelo, como pueden ser flujos laterales a favor de la mayor permeabilidad de la capa más profunda y la existencia, comprobada en campo, de pequeñas capas más impermeables.

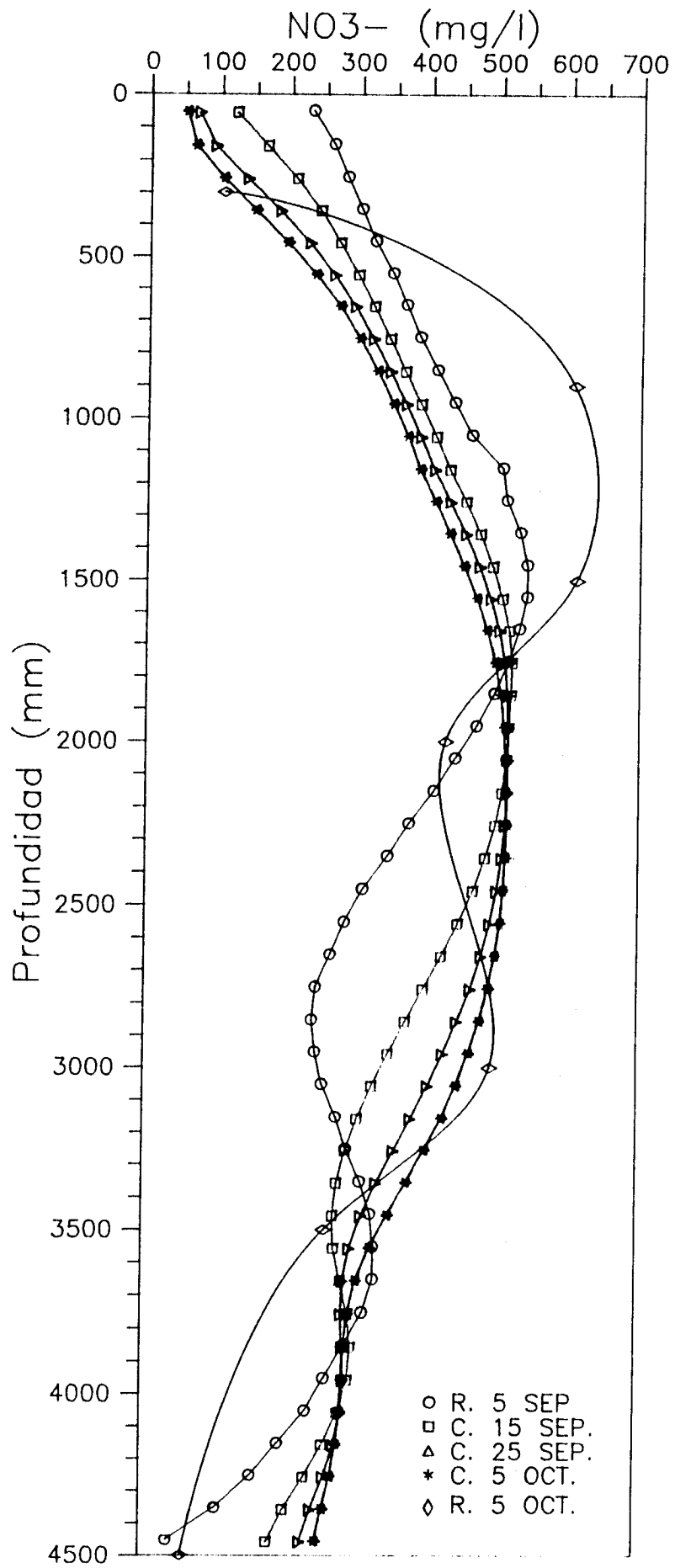


Fig. 5.5.- Perfiles reales y calculados en la simulación



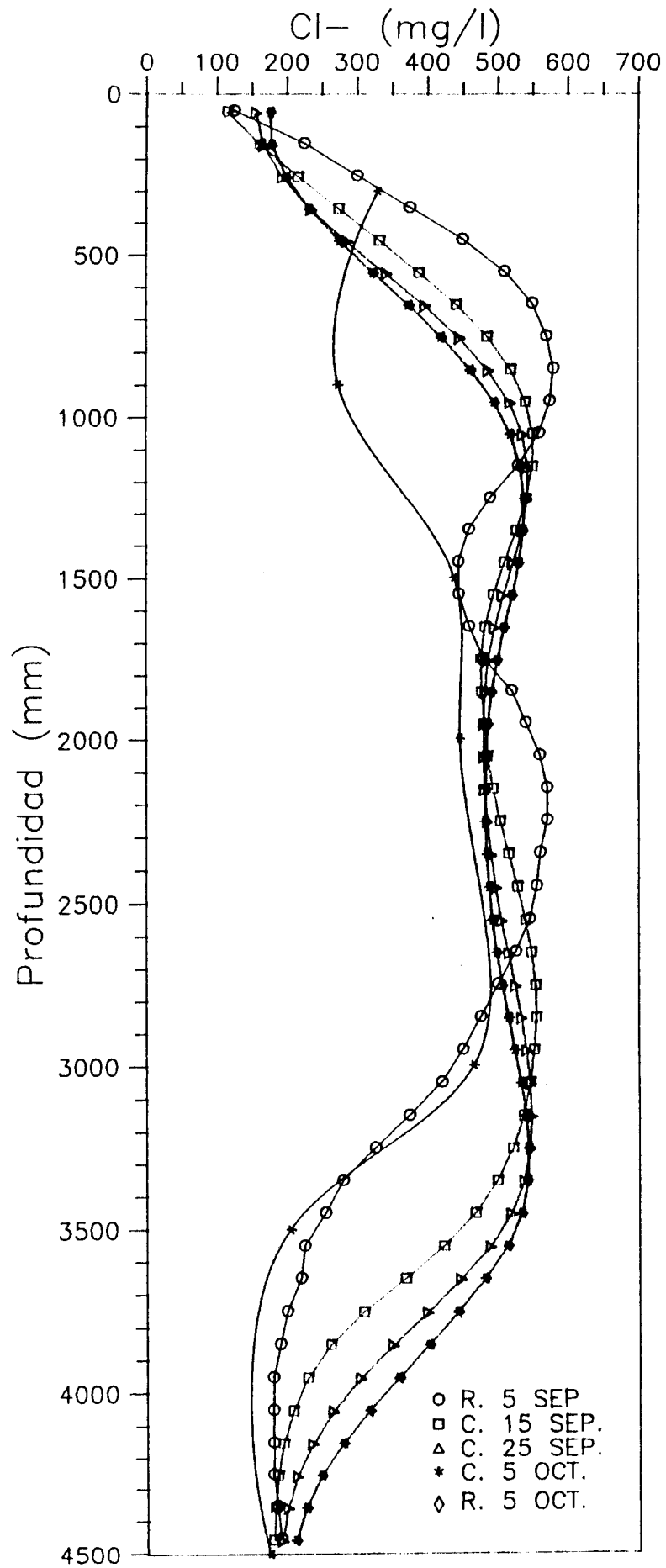


Fig. 5.6.- Perfiles reales y calculados en la simulación

## **6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS**

## 6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El modelo de simulación del transporte y transformación de especies nitrogenadas LEACHN, aplicado a dos períodos de un mes de duración en 1989 ha aportado, por un lado, una modelización del flujo de agua en la zona no saturada muy similar a la obtenida por el modelo SWATRE (ver Parte II). No obstante, la simulación de la evolución temporal de los perfiles de concentración de nitratos no ha arrojado buenos resultados debido a:

- a.-Desconocimiento de los valores que toman diversos parámetros esenciales: dispersividad, tasas de transformación, coeficientes de distribución, cantidad de nitrógeno que es capaz de extraer un tipo determinado de planta, etc.
- b.-Ausencia de datos acerca de la distribución de nitratos en profundidad con periodicidad inferior a la mensual considerada hasta ahora.
- c.-Falta de datos acerca de la presencia y aporte de nitrógeno orgánico al sistema.

El primer punto ha sido objeto de un tratamiento exhaustivo en este estudio, dado que los parámetros mencionados han sido variados de forma notable a fin de estimar la sensibilidad del sistema a su variación. En lo referente a la dispersividad, se ha aceptado un valor del orden de 40-100 mm como representativo del medio a la escala considerada. Respecto a las tasas de hidrólisis y transformación de las especies nitrogenadas no se ha podido

obtener un rango de valores que se considere apropiado. Debe notarse que estos parámetros no suelen presentar un valor constante en todo el perfil.

Respecto al segundo punto, debe notarse de nuevo que tanto los perfiles iniciales como finales considerados para las simulaciones no tienen por qué ser representativos de los perfiles reales existentes en los días considerados dado que son resultado de la extracción de agua del suelo por el tomamuestras durante todo un mes. Por tanto, y como ya se comentó en la descripción de las condiciones iniciales, las concentraciones obtenidas deben ser una mezcla en proporciones variables de la presente durante todo el mes.

Por último, debe mencionarse la posible importancia que puede tener la presencia de nitrógeno orgánico tanto en los perfiles iniciales como en las aportaciones en los abonados.

De las simulaciones presentadas tan sólo ha arrojado buenos resultados la correspondiente al período de 30 de mayo a 28 de junio. Esto se debe fundamentalmente a que, por un lado, en ese período no había plantas en la parcela y, por otro lado, el estado de humedad del suelo no sufrió variaciones importantes, lo que origina que el sistema estuviese, prácticamente, en régimen estacionario.

Por el contrario, las simulaciones realizadas para el período de septiembre-octubre de 1989, considerando la evolución de las especies nitrogenadas y de los cloruros (soluto conservativo) no han dado buenos resultados. Ello puede deberse tanto a las imprecisiones en los datos que

han sido comentados más arriba como, quizá, a la propia definición de las características físicas de las capas o a la presencia de componentes de flujo no verticales.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados comentados anteriormente permiten obtener una serie de conclusiones respecto al funcionamiento del sistema modelado y los aspectos que deben ser mejorados para una caracterización más precisa del medio.

Así, parece necesario obtener el orden de magnitud de algunos parámetros fundamentales para evaluar el transporte y transformación de las especies nitrogenadas. La estimación de estos parámetros, ya comentada ampliamente en apartados anteriores, junto con la integración de los resultados que se obtengan tras un cierto período de control de la cuba lisimétrica que se ha instalado en las proximidades de la parcela experimental E-2, permitirá precisar los componentes del balance tanto de agua como de solutos.

Por otra parte, y pese a que las simulaciones de flujo que se presentaron en la Parte II han reproducido de forma aceptable la tensiometría registrada en campo, debe ponerse énfasis en una definición de detalle de las características físicas e hidráulicas del perfil de la zona no saturada. Así, deberían estimarse las curvas de retención y de permeabilidad en más puntos tanto arealmente como en profundidad, las funciones de extracción y crecimiento de las plantas, y realizarse medidas de contenido de humedad en el perfil que permitan un segundo elemento de calibración del flujo de agua.

Estas medidas de humedad deben considerarse como un aspecto básico para precisar el balance de nitrógeno en la

zona, puesto que una buena simulación del transporte debe ir siempre precedida de una correcta caracterización del flujo.

En este sentido, se puede mencionar por último que debe estudiarse la unidimensionalidad del flujo en las parcelas experimentales dado que la posible existencia de componentes laterales del flujo puede ser responsable de alguna de las discrepancias observadas entre las simulaciones de flujo y transporte y los datos de campo.