

ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE N-PURÍN EN COLUMNAS EXPERIMENTALES. CALIBRACIÓN DEL MODELO PRZM-3 EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD Y LA GRANULOMETRÍA DE LA COLUMNA

M.I. Montoya¹ y M. Martín²

¹Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España; mamoncam@doctor.upv.es

²Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España; mmartin@hma.upv.es

RESUMEN. La ganadería porcina, en muchas partes del mundo, tiene un peso importante en la economía rural, pudiendo existir problemas con sus residuos orgánicos (purines). Si la gestión se ajustara a buenas prácticas agrarias, las cosechas se podrían beneficiar de los nutrientes aportados. En donde esto no se cumple, se están poniendo en peligro los cauces de los ríos y las aguas subterráneas.

Con el fin de estudiar el N-purín en la zona no saturada se realizaron una serie de ensayos por medio de columnas experimentales de longitud, granulometría y dosificación de purín variables. La dosis total aplicada por columna varía entre 194 y 285 kgNT/ha. El experimento duró ocho meses, desde el 08/02/2002 hasta el 19/09/2002.

Los datos observados de nitrógeno (N_{org} , NO_3^- , NH_4^+) lixiviado y las concentraciones finales en el suelo se utilizaron para calibrar el modelo PRZM-3. Debido a las diferencias entre las granulometría de las columnas, diferencias que modifican tanto el comportamiento hidráulico como el transporte y transformaciones del nitrógeno, los valores calibrados para las de granulometría “fina” no arrojaban buenos resultados para las demás columnas. Por esta razón se realizaron dos calibraciones, una respecto al porcentaje de rocas en la columna, valor constante en el tiempo y fácil de determinar y la segunda respecto al contenido de humedad del suelo al final de las experimentaciones. Esta relación matemática se puede utilizar para suelos, conociendo la humedad final, que hayan sido sometidos a un régimen de lluvias durante un intervalo de tiempo similar al de estos ensayos. Los errores de los valores simulados en ambas calibraciones respecto a los datos observados tienen órdenes de magnitud comparables.

ABSTRACT. The pig slurry, in many zones of the world, plays an important roll in the rural economy, but his organic residues can be the origin of some problems. So, if the management is adjusted to good agrarian practices, the crops might take advantage from the contributed nutrients. However, when this is not fulfilled, they can put in danger the riverbeds and underground waters.

In order to study the N-Slurry in the unsaturated zone, a series of tests were done by means of experimental columns

with length, soil texture and amount of slurry variables. The total amount of slurry applied by column varies between 170 and 250 kgNT/ha. The experiences were carried out during eight months, since 08/02/2002 till 19/09/2002.

The observed concentrations of nitrogen (N_{org} , NO_3^- , NH_4^+) in the leaching and in the soil were used to calibrate the PRZM-3 model. Due to the differences between the texture of the soils in columns, which modify the hydraulic behaviour as well as the transport and transformations of nitrogen, the values obtained from the calibration of those of thin texture were not useful to be computed with the other columns. For this reason, two calibrations were made. The first one related with the rocks percentage in the column, which is a constant value easily determinable, and the second one related with the soil water content at the end of the experiments. This mathematical relation can be used for soils, knowing the final soil moisture, that have been submitted to a regime of rains and during an interval of time similar to those of these experiences. Errors in both calibrations compared to the observed information have comparable orders of magnitude.

1. Introducción

El nitrógeno es un elemento esencial para la vida y el desarrollo de las plantas y animales. La cantidad total de nitrógeno existente en la naturaleza, tanto en forma orgánica como inorgánica, se mantiene constante a lo largo del tiempo. El nivel de equilibrio del nitrógeno es obtenido debido a la maduración del ecosistema (Haynes, 1986). Sin embargo, debido a una serie de procesos químicos y físicos (amonificación, nitrificación, desnitrificación, etc.) hacen que la cuantía existente en una forma en concreto pueda variar. Este equilibrio se ve afectado por actuaciones del hombre como son la agricultura, la ganadería, actividades industriales, aguas residuales urbanas, etc. Todo ello ha contribuido, de modo general, al incremento del contenido de nitrógeno en el suelo, que por lixiviación, han pasado a las aguas, especialmente subterráneas, en forma de nitratos,

lo que, desde hace años viene preocupando por su posible incidencia sobre la salud, Sanchís (1991).

En España, al igual que en muchos países de la Comunidad Europea, el agua subterránea es la mayor fuente de abastecimiento público. En muchos pozos las concentraciones de NO_3^- se incrementan, se acercan e incluso sobrepasan el nivel estándar de la Comunidad Europea de 50 mg/l, Wolfgang (1989).

Debido a la problemática del nitrógeno en las aguas subterráneas y al desconocimiento de las transformaciones y forma de movimiento del nitrógeno en el suelo, se vio la necesidad de simular su comportamiento en el suelo por medio de columnas y su posterior modelación.

En este trabajo se comparan los datos observados de nitrógeno (N_{org} , NO_3^- , NH_4^+) lixiviado y las concentraciones finales en el suelo con los resultados obtenidos por dos calibraciones diferentes del modelo PRZM-3, una respecto al porcentaje de rocas y la segunda respecto al contenido de humedad al final de las experimentaciones.

2. Materiales

Los datos experimentales de nitrógeno lixiviado y retenido en el suelo que se utilizaron para calibrar el modelo PRZM-3, se obtuvieron del estudio llevado a cabo en la Universidad Politécnica de Valencia, laboratorio de Ingeniería Sanitaria, ETSICCP. Los ensayos se realizaron mediante 9 columnas de metacrilato de 10 cm de diámetro, longitud variable (40, 100 y 150 cm), con suelo natural de diferentes granulometrías (fina, media y gruesa), a las cuales se aplicaron tres dosis de purín diferentes y agua destilada simulando la precipitación típica de la zona de estudio, Montoya y Martín (2005).

Los estudios de laboratorio permiten analizar los procesos de interés bajo condiciones controladas o al menos conocidas (humedad, temperatura, tipo de suelo, longitud de la columna, etc.), logrando establecer con claridad la dependencia de la dinámica del nitrógeno con variables difícilmente controlables a escala de campo.

3. Descripción del modelo PRZM-3

PRZM-3 (Pesticide Root Zone Model release 3), es un programa desarrollado por la United States Environmental Protection Agency (EPA) para simular el transporte y transformación de diferentes tipos de pesticidas y nitrógeno a través de la zona de raíces y en la zona no saturada del suelo. Modela contaminación debido a fuentes difusas, lo cual implica la realización de balances hídricos para caracterización y estimación de los procesos de infiltración.

3.1. Módulo hidrológico

El PRZM-3 realiza los cálculos hidrológicos a escala diaria. Esto representa una limitación, algunos procesos como la evaporación o escorrentía que deberían ser simulados en escalas menores para conseguir una mayor exactitud, Carsel et al. (1995). PRZM-3 simula múltiples

horizontes que pueden ser vistos como zonas de diferentes características, formados por múltiples compartimientos paralelos unidos entre sí. El número de compartimientos depende del grado de exactitud y resolución espacial requerida. El PRZM estima la escorrentía y la erosión por medio de las técnicas del Soil Conservation Service (SCS). La evapotranspiración se estima a partir de los datos de evaporación en tanque o con la fórmula Hamon.

El modelo PRZM-3 simula el movimiento del agua en el suelo como drenaje libre o restringido. El drenaje libre es función de la capacidad de campo y el punto de marchitez y asume que una vez el contenido de humedad es mayor que la capacidad de campo en una capa, el exceso de agua pasa a la siguiente, asumiendo que el perfil total drena en un día. Esta forma es más aproximada para suelos mixtos como en nuestro caso, en los cuales el movimiento del agua es relativamente no obstaculizado, mientras es menos preciso para suelos muy arcillosos que pueden tener capas que obstaculizan el drenaje libre. De igual forma puede inducir a un movimiento anticipado del contaminante a través del perfil, principalmente en suelos profundos, Carsel et al. (1995). El drenaje restringido se utiliza para suelos con capas de bajas permeabilidades que restringen el drenaje libre. PRZM solo simula movimiento advectivo del agua hacia abajo y no tiene en cuenta el movimiento debido a mecanismos de capilaridad ni el movimiento ascendente del agua por evapotranspiración.

3.2. Modelación del ciclo del nitrógeno

El PRZM representa seis formas distintas de compuestos nitrogenados: nitrato, amonio, nitrógeno orgánico particulado (lábil y refractario) y disuelto (lábil y refractario). Las entradas de nitrógeno al sistema son debido a la deposición atmosférica, introducción por fosa séptica y aplicación superficial de fertilizantes y/o abonos.

Las transformaciones producidas en el suelo incluyen la toma por las plantas de nitrato y amonio, paso de nitrógeno de las plantas al suelo al descomponerse, desnitrificación, inmovilización de amonio y nitratos, amonificación, volatilización del amonio, fijación del nitrógeno atmosférico y adsorción del amonio. Todas estas reacciones son actualizadas y cuantificadas cada día.

La adsorción y desorción del amonio pueden calcularse con una cinética de primer orden o con la isoterma de Freundlich. Las otras reacciones son combinación de transformaciones biológicas y químicas que también son modeladas por cinéticas de primer orden. El parámetro óptimo de la tasa de cinética de primer orden se corrige para temperaturas del suelo por debajo de 35° C así:

$$KK = K * TH^{(TMP-35)} \quad (1)$$

Donde: KK es la tasa de transformación corregida por temperatura (1/día), K es el parámetro óptimo para la tasa de reacción (1/día), TH coeficiente de corrección de temperatura (adimensional, generalmente igual a 1.06) y TMP es la temperatura de la capa del suelo (° C). Cuando la temperatura del suelo es superior a 35° C se estima que esta

en el óptimo (KK se iguala a K), cuando está por debajo de 4° C o está seca, no hay procesos bioquímicos.

La volatilización del amonio se calcula con una tasa de primer orden, con un ajuste por temperatura del aire un poco diferente a la descrita anteriormente. Esta forma de simular la volatilización, aunque para otros tipos de residuos pueda ser correcta, en el caso del purín no lo es. Según una gran cantidad de experimentos, la volatilización completa se produce (dependiendo de la temperatura) en las primeras 48 horas, Moal et al. (1995). Una forma sencilla de evitar este problema, es reducir la parte volatilizada de la entrada de amonio e igualar la constante a cero, Carsel et al. (1995).

La toma de nitrógeno por las plantas también se representa con una cinética de primer orden con ajuste de temperatura. Dichas tasas se pueden especificar para cada horizonte de suelo y variar mes a mes para aproximarse a los patrones mensuales de crecimiento y la toma de nutrientes. El PRZM3 puede modelar la conversión del nitrógeno de las plantas (por cinéticas de primer orden) a nitrógeno orgánico (labil particulado). El nitrógeno orgánico varía en cada capa de suelo, se incrementa por inmovilización de nitratos y amonio y son reconvertidas a amonio por mineralización.

Una gran limitación del PRZM3 es que el proceso de desnitrificación se rige sólo por una constante de desnitrificación y un umbral de humedad a partir del cual se produce la desnitrificación. La literatura técnica considera como hipótesis más realista que la desnitrificación está en función de la humedad. Esta dificultad puede ser salvada haciendo simulaciones cortas (el mínimo es un día) y variando la constante de desnitrificación en función del contenido de humedad. Tampoco introduce la dependencia de la desnitrificación, ni en ningún otro proceso, al contenido de carbono en el suelo. De igual forma, la mineralización del nitrógeno orgánico también es función de la humedad y dadas las grandes cantidades disponibles, considerar o no la humedad del suelo puede incurrir en grandes errores. Por este motivo, las constantes de mineralización calibradas para este modelo, no serían comparables con las de otros que tengan en cuenta la humedad del suelo, ya que esta constante tendría internamente el factor de humedad.

4. Calibración del modelo PRZM-3

La calibración del modelo PRZM3 se dividió en dos partes. Primero se calibró la hidráulica teniendo como criterio el menor error en el volumen simulado del agua lixiviada respecto al volumen lixiviado real y perfiles de humedad similares a los experimentales al final de las experiencias. Posteriormente se calibró el nitrógeno teniendo como criterio obtener el menor error de las formas nitrogenadas lixiviadas simuladas respecto al nitrógeno total lixiviado experimental y perfiles finales simulados de las formas nitrogenadas retenidas en el suelo similares a los experimentales al final de las experiencias.

Después de escogido el método del drenaje libre, se procedió a la calibración de los valores de capacidad de

campo y punto de marchitez, propiedades medibles in situ o en laboratorio. Según Kramer et al. (1995), la capacidad de campo de un suelo con drenaje libre en el campo es diferente a la de una columna del mismo suelo. Asimismo, Hillel, (1980), expone que no solo la textura del suelo, el tipo de arcillas presentes, la materia orgánica, etc., sino también la estructura del suelo afectan la capacidad de campo. Por estas razones se vio la necesidad de calibrar dichos parámetros. Además, el modelo PRZM3 considera un suelo homogéneo, basado en su porcentaje de arena, limo y arcilla solamente, sin hacer diferencia entre suelos con diferentes porcentajes de rocas, como es el caso de las restantes 6 columnas; Por lo tanto, la calibración se realizó inicialmente con las columnas “finas” (C3, C6 y C9) y posteriormente se encontró una relación basada en estos valores calibrados y el porcentaje de rocas de cada una de las columnas. Analizando los perfiles de humedades reales al final de las experimentaciones, se vio un mayor contenido de agua en la zona inferior, posiblemente por la colmatación del filtro de gravas, evitando el libre drenaje; por este motivo el suelo se dividió en tres horizontes: el primero es una zona menos compacta por no tener suelo por encima de el y donde se aplica el purín, el segundo representa un suelo homogéneo de granulometría fina (material que pasa el tamiz de 2 mm) y el tercero refleja un suelo más compacto con drenaje restringido. Los valores que producen una mejor calibración en promedio a las tres columnas “finas” fueron: $CC_1=0.16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $CC_2=0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $CC_3=0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $PM_1=0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $PM_2=0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $PM_3=0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Los valores calibrados de la capacidad de campo son un poco menores que el valor obtenido en el laboratorio, debido a las diferencias de obtenerlos en condiciones de laboratorio o “in situ”. Determinar la capacidad de campo “in situ”, tiene la ventaja de trabajar con el suelo inalterado a la profundidad deseada, mientras en el laboratorio se hace en un tubo de percolación con suelo alterado, sin reflejar la compactación que tendría el suelo natural; en nuestro caso suelo de una columna de 150 cm compactado tanto debido al peso del suelo como a su acomodación por el movimiento del agua. Simular el flujo en algunas columnas con los valores de capacidad de campo y punto de marchitez determinados experimentalmente, el caudal de salida es nulo, mientras que con los valores calibrados se obtiene un error promedio de 7.11%, lo cual indica que las columnas, por diferentes procesos, poseen valores de capacidad de campo menores.

Se ajustaron tres curvas de capacidad de campo en función del porcentaje de rocas, una para cada horizonte. Para unificar dichas ecuaciones, se dividieron cada una de ellas por su respectivo valor Capacidad de Campo Calibrada Suelo “Fino” (CC_F), encontrándose una sola ecuación en función del porcentaje de rocas y del valor de la capacidad de campo para suelo fino correspondiente para cada horizonte, así:

$$CC_R = CC_F * \left(-1.3219 * \left(\frac{\%R}{100} \right)^2 + 0.2757 * \left(\frac{\%R}{100} \right) + 1.0377 \right) \quad (2)$$

Donde: %R = porcentaje de rocas, CC_F = capacidad de campo calibración columnas “finas” y CC_R = capacidad de campo suelo de granulometría variable (cm^3/cm^3).

El ciclo del nitrógeno es sensible a diversos factores ambientales. Para tener en cuenta su efecto, la mayoría de los modelos multiplican la constante de cada proceso por una función de respuesta para cada factor. El modelo PRZM3 solo utiliza una función de respuesta a la temperatura del suelo, sin tener en cuenta uno de los factores más importantes, la humedad del suelo. Para tratar de salvar esta deficiencia y aunque la humedad del suelo varía día a día, se buscó una relación entre las diferentes constantes del ciclo del nitrógeno y el contenido de humedad del suelo al final de las experimentaciones. La mineralización se calibró por medio de una ecuación exponencial decreciente, la desnitrificación por medio de una exponencial creciente y la nitrificación con una tangente hiperbólica creciente (para reflejar la tasa máxima de nitrificación entre el punto de marchitez y la capacidad de campo), ver Tabla 1.

Debido a que la humedad no es constante en el tiempo, se realizó otra calibración basada en una característica del suelo fácil de establecer. Se encontró una relación entre las diferentes constantes del ciclo del nitrógeno y el porcentaje de rocas o material no activo en los procesos. La mineralización se calibró por medio de una ecuación exponencial creciente, la desnitrificación por medio de una exponencial decreciente y la nitrificación con una tangente hiperbólica creciente, (ver Tabla 1).

Tabla 1. Valores parámetros a, b, c y d de las ecuaciones de las constantes del ciclo del nitrógeno KMIN, KNIT y KDES, calibración respecto: porcentaje de rocas y humedad al final de las experimentaciones.

	KMIN		KNIT		KDES	
	a*exp(-d*%-c)-b %Rocas %Hum.	a*exp(-d*%-c)-b %Rocas %Hum.	a*tanh(d*%-c)+b %Rocas %Hum.	a*tanh(d*%-c)+b %Rocas %Hum.	a*exp(d*%-c)+b %Rocas %Hum.	a*exp(d*%-c)+b %Rocas %Hum.
a =	0,001685	0,022485	0,20	0,3	0,155	0,025
b =	-0,001745	0,000245	0,70	0,35	0,071	0,065
c =	0,2	0,1	1,47	8,7	1,19	0,8
d =	-0,0133	0,07	0,02	1,1	-0,051	0,08

5. Resultados

5.1. Valores de las constantes del ciclo del nitrógeno

Al utilizar las ecuaciones de las constantes del ciclo del nitrógeno respecto al porcentaje de humedad y de rocas, se encontró, pese a que el porcentaje de rocas tiene una mayor dispersión (63.65%) que el porcentaje de humedad (6.61%), las constantes del ciclo del nitrógeno presentan menor dispersión (KMIN=12.94%) que las obtenidas con respecto al porcentaje de Humedad (KMIN=46.46%). En la Tabla 2 se muestran los valores calculados de las diferentes constantes del ciclo del nitrógeno para los dos horizontes de suelo analizados (horizonte dos y tres se consideran iguales a efectos del ciclo del nitrógeno).

5.2. Calibración columnas longitud corta (40 cm)

Las columnas de 40 cm presentaron errores en los nitratos lixiviados respecto al nitrógeno total muy altos, entre el 40 y 80%, debido al error producido en la calibración hidráulica para estas columnas, siendo un poco más altos los errores con la calibración respecto al

porcentaje de rocas; Por el contrario el amonio y el nitrógeno orgánico lixiviados presentaron errores muy bajos, corroborando la hipótesis del error debido a la hidráulica, ya que estas dos formas son menos móviles que los nitratos, por lo tanto les afecta menos los errores producidos en el agua lixiviada.

El nitrógeno retenido en el suelo en ambas calibraciones, presentó errores relativos en el amonio altos y también valores negativos altos en los nitratos, corroborando que en las columnas de 40 cm prevalece el lixiviado de nitratos frente al retenido, siendo estos errores respecto al nitrógeno total muy bajos. El error del nitrógeno orgánico retenido en el suelo varía entre 3 y 11% respecto al nitrógeno total, valores muy aceptables (ver Tabla 3).

Tabla 2. Valores constantes del ciclo del nitrógeno: calibración respecto porcentaje de humedad y porcentaje rocas (X: media, S: desviación, S(%): desviación estándar porcentual).

	Calibración % de Rocas				Calibración % de Humedad			
	(%)	KMIN (x10-4)	KDES	KNIT	KMIN (x10-4)	KDES	KNIT	(%)
C1-1	62,55	49,15	0,0729	0,6569	85,85	0,0942	0,6499	11,924
C1-2	33,54	39,00	0,0795	0,5673	43,26	0,1269	0,6500	21,330
C2-1	44,01	42,22	0,0760	0,5940	87,35	0,0936	0,6499	11,684
C2-2	26,65	37,11	0,0831	0,5532	47,44	0,1210	0,6500	20,079
C3-1	9,18	33,04	0,1005	0,5284	60,00	0,1083	0,6500	16,873
C3-2	9,18	33,04	0,1005	0,5284	30,06	0,1564	0,6500	26,198
C4-1	28,86	37,70	0,0818	0,5575	111,86	0,0867	0,4533	8,236
C4-2	41,80	41,50	0,0766	0,5878	51,94	0,1157	0,6500	18,848
C5-1	14,78	34,24	0,0932	0,5349	118,90	0,0853	0,1932	7,382
C5-2	29,74	37,94	0,0813	0,5592	42,84	0,1275	0,6500	21,463
C6-1	9,18	33,04	0,1005	0,5284	108,40	0,0875	0,5561	8,675
C6-2	9,18	33,04	0,1005	0,5284	38,56	0,1351	0,6500	22,879
C7-1	49,37	44,05	0,0748	0,6104	112,71	0,0865	0,4215	8,130
C7-2	50,96	44,62	0,0745	0,6155	43,22	0,1269	0,6500	21,342
C8-1	18,83	35,17	0,0890	0,5404	118,42	0,0854	0,2073	7,439
C8-2	30,41	38,12	0,0810	0,5606	48,96	0,1191	0,6500	19,650
C9-1	9,18	33,04	0,1005	0,5284	113,55	0,0863	0,3883	8,026
C9-2	9,18	33,04	0,1005	0,5284	39,17	0,1339	0,6500	22,669
X	27,03	37,73	0,0871	0,5615	72,36	0,1098	0,5566	15,71
S	17,21	4,88	0,0109	0,0376	33,62	0,0222	0,1564	6,61
S(%)	63,65	12,94	12,57	6,69	46,46	20,20	28,10	42,05

5.3. Calibración columnas longitud media (100 cm)

Las columnas de 100 cm también presentaron errores relativos altos en el amonio en ambas calibraciones, entre 66 y 172%, siendo estos errores respecto al nitrógeno total muy bajos (entre 0.34 y 0.97%). Con respecto a los nitratos, la columna C4 de granulometría gruesa y dosis alta, obtuvo un error relativo alto en los nitratos lixiviados del 105% (83% respecto al Nitrógeno Total), siendo un poco más alto en la calibración respecto al porcentaje de rocas, las otras dos columnas obtuvieron valores muy aceptables. El nitrógeno orgánico presentó errores negativos muy bajos, lo cual indica que teóricamente se ha mineralizado un poco más (ver Fig(s). 1, 2 y 3).

Respecto al nitrógeno retenido en el suelo, se presentaron errores relativos en el amonio un poco altos (36 y 71%), siendo un poco menores los obtenidos con la calibración respecto al porcentaje de rocas; igualmente se obtuvieron valores negativos un poco altos en los nitratos (-23 y -47%), sin embargo, estos errores respecto al nitrógeno total son muy bajos, lo cual indica que es una calibración, desde el

punto de vista de la seguridad, buena porque no se esta subvalorando en gran porcentaje el nitrógeno total que quedaría disponible para eventos futuros de mineralización, nitrificación y posterior lixiviación en forma de nitratos que sería el mayor problema ambiental. El error del nitrógeno orgánico retenido en el suelo varía entre 3 y 13% respecto al nitrógeno total, valores muy aceptables.

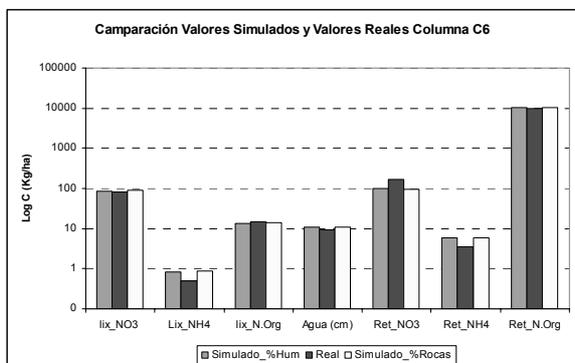


Fig. 1. Resultados calibración: porcentaje rocas y humedad, columna C6 (100 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

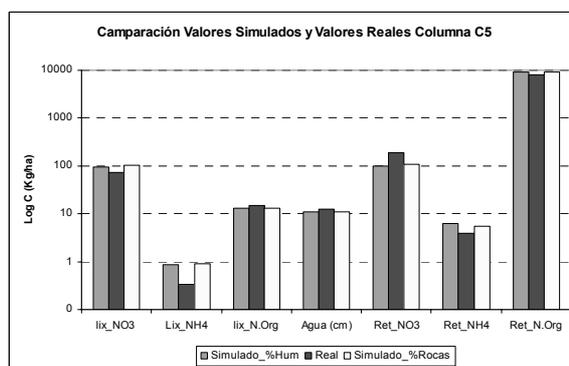


Fig. 2. Resultados calibración: porcentaje de rocas y humedad, columna C5 (100 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

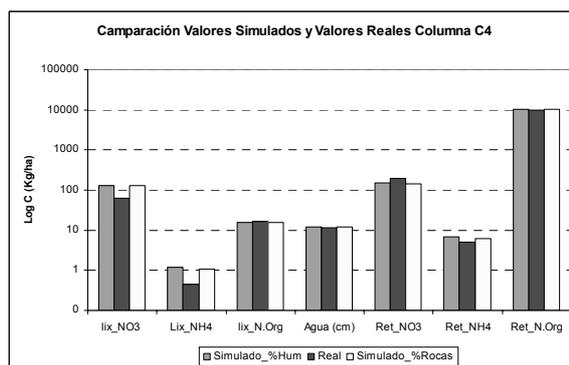


Fig. 3. Resultados calibración: porcentaje de rocas y humedad, columna C4 (100 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

Tabla 3. Resultados calibración ciclo del nitrógeno respecto al porcentaje de rocas y humedad, columnas de 40 cm: Cantidades lixiviadas y retenidas teóricas, reales, errores respecto al valor experimental y errores respecto al Nitrógeno Total experimental.

C1 (Kg/ha)	Valor Real	Calibración % Rocas			Calibración % Humedad		
		Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$	Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$
NO ₃ ⁻	57.00	129.33	126.91	86.19	126.13	121.29	82.38
NH ₄ ⁺	0.75	1.42	88.02	0.79	1.36	80.47	0.72
N.O.	26.17	23.24	-11.22	-3.50	23.10	-11.74	-3.66
Agua (cm)	14.82	17.05	15.02		17.05	15.02	
Ret_NO ₃ ⁻	53.19	23.62	-55.59	-0.98	26.35	-50.46	-0.89
Ret_NH ₄ ⁺	1.09	2.03	86.64	0.03	2.06	89.67	0.03
Ret_N.O.	2960.8	3317.76	12.06	11.84	3305.87	11.65	11.44
C2 (Kg/ha)	Valor Real	Calibración % Rocas			Calibración % Humedad		
		Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$	Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$
NO ₃ ⁻	80.78	167.73	107.63	79.59	168.77	108.92	80.55
NH ₄ ⁺	0.54	1.37	153.08	0.76	1.50	177.52	0.88
N.O.	27.91	23.12	-17.17	-4.39	22.80	-18.33	-4.68
Agua (cm)	14.91	17.43	16.89		17.43	16.89	
Ret_NO ₃ ⁻	39.87	23.63	-40.73	-0.54	32.31	-18.97	-0.25
Ret_NH ₄ ⁺	1.06	2.02	90.63	0.03	2.21	109.31	0.04
Ret_N.O.	2988.9	3238.22	8.34	8.23	3213.39	7.51	7.41
C3 (Kg/ha)	Valor Real	Calibración % Rocas			Calibración % Humedad		
		Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$	Valor Calib.	Error Relativo	$(V_i - V_r) / V_i NT$
NO ₃ ⁻	89.60	142.60	59.15	48.66	134.13	49.70	40.88
NH ₄ ⁺	0.19	1.33	594.41	1.05	1.00	423.13	0.74
N.O.	19.14	23.91	24.96	4.39	23.98	25.31	4.45
Agua (cm)	12.52	17.28	38.10		17.28	38.10	
Ret_NO ₃ ⁻	50.53	20.35	-59.72	-0.89	20.82	-58.80	-0.88
Ret_NH ₄ ⁺	0.55	2.06	276.10	0.04	1.93	251.81	0.04
Ret_N.O.	3341.9	3471.99	3.89	3.84	3467.00	3.74	3.69

5.4. Calibración columnas longitud larga (150 cm)

Las columnas de 150 cm, fueron las que presentaron menores errores promedio tanto relativos como respecto al nitrógeno total en las tres formas nitrogenadas. La columna C7 presentó el mayor error en el lixiviado de nitratos (25% calibración respecto a la humedad y 38% respecto al porcentaje de rocas).

Respecto al nitrógeno orgánico retenido el error fue muy bajo exceptuando la columna C7 (15% en ambas calibraciones) que obtuvo el mayor error de todas las columnas. El amonio y los nitratos presentaron valores aceptables en ambas calibraciones (ver Fig(s) 4, 5 y 6).

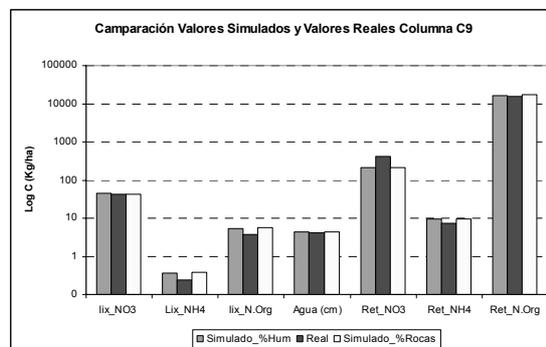


Fig. 4. Resultados calibración: porcentaje de rocas y humedad, columna C9 (150 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

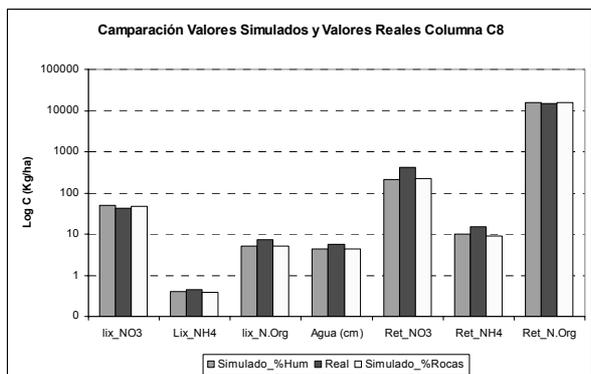


Fig. 5. Resultados calibración: porcentaje de rocas y humedad, columna C8 (150 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

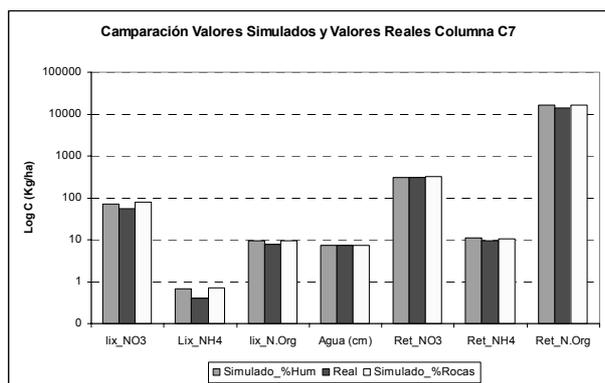


Fig. 6. Resultados calibración: porcentaje de rocas y humedad, columna C7, (150 cm), cantidades lixiviadas y retenidas simuladas y reales.

A continuación se muestran los perfiles del nitrógeno retenido en el suelo al final de las experimentaciones. Los nitratos se encuentran disueltos en el agua y están disponibles para ser lavados hacia el acuífero, por esta razón, no es correcto presentarlo en Kg/ha*cm como en el amonio y el nitrógeno orgánico, los cuales se encuentran retenidos en el suelo. Se representa en mg contenidos en la humedad del suelo (ver Fig(s). 7, 8 y 9).

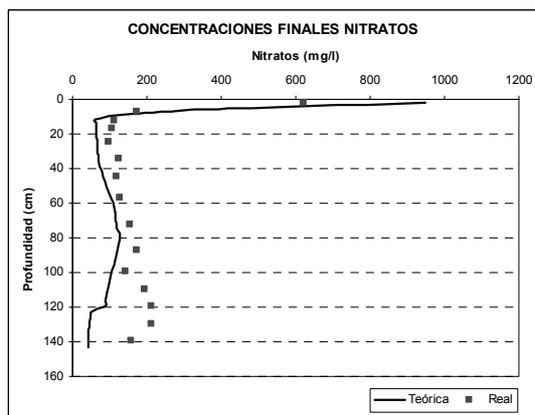


Fig. 7. Perfiles experimentales y simulados de nitratos retenidos en el suelo al final de la experimentación, columna C9 fina de 150 cm.

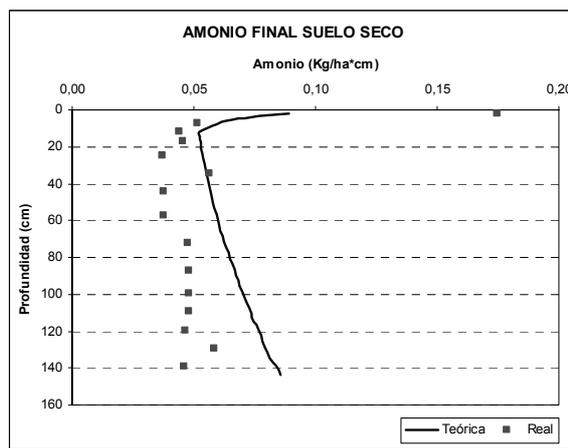


Fig. 8. Perfiles experimentales y simulados de amonio retenidos en el suelo al final de la experimentación, columna C9 fina de 150 cm.

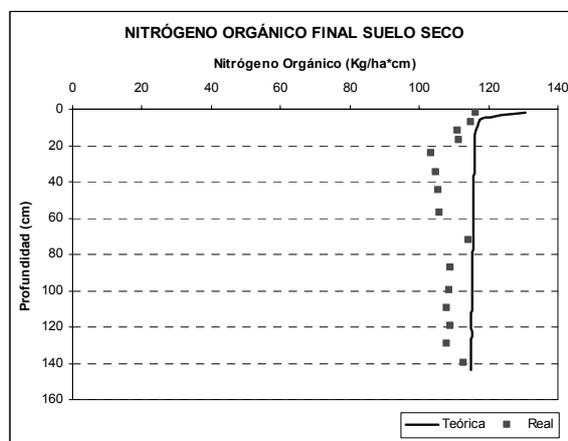


Fig. 9. Perfiles experimentales y simulados nitrógeno orgánico retenidos en el suelo, columna C9 fina 150 cm.

6. Conclusiones

Ambas calibraciones presentan errores promedios muy similares, sin embargo pese a que el porcentaje de rocas tiene una mayor dispersión porcentual (63.65%) que el porcentaje de humedad (42.05%), las constantes del ciclo del nitrógeno presentan menor dispersión que las obtenidas con la calibración respecto al porcentaje de Humedad ($KMIN_ \%Rocas=12.94\%$ y $KMIN_ \%humedad= 46.46\%$). Utilizar el modelo PRZM3 con los valores medios de las constantes del ciclo del nitrógeno en vez de los valores de las constantes dados por la ecuación de ajuste respecto al porcentaje de rocas, aumentaría el error en los nitratos lixiviados en un 10%. Si no se conocieran las características del suelo o el contenido de humedad después de un período de lluvias simular al nuestro, sería más conveniente utilizar los valores medios de la calibración respecto al porcentaje de rocas que los valores medios de la calibración respecto a la humedad.

Agradecimientos. El trabajo ha sido en parte financiado con fondos de la diputación Provincial de Castellón.

Referencias

- Carsel, R.F., Imhoff, J.C., Hummel, P.R. Cheplick, J.M., Donigian, A.S. 1995. PRZM-3, A Model for Predicting Pesticide and Nitrogen Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: Users Manual for release 3.0. National Exposure Research Laboratory Office of Research and development U.S. Environmental Protection.
- Haynes, R. J. 1986. Mineral Nitrogen in the Plant – Soil System. Agricultural Research Division Ministry of Agriculture and Fisheries Lincoln, Canterbury, New Zealand.
- Kramer, P.J., Boyer, J.S. 1995. Water relations of plants and soils. United States of America.
- Martinez, J; Moal, J-F; Guizou, F et al. 1995. Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE, 1995, vol. 125, no. 2, 245-252 pp.
- Montoya, M.I., Martín, M. Análisis de la Varianza (ANOVA) en Ensayos de Lixiviación de N-Purín en Columnas Experimentales, Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol VII.
- Sanchis M. Emilio J. 1991. Estudio de la Contaminación por Nitratos de las Aguas subterráneas de la Provincia de Valencia. Origen, Balance y Evolución Espacial y Temporal. Conselleria d'Administració Pública de la Generalitat Valenciana, Valencia.
- Wolfgang M., Rolf, M. 1989 Nitrate in groudwater, en Groundwater Management: Quantity and Quality, Sahuquillo, A., J. Andreu, T. O'Donnell, Benidorm, Spain.