

## **Predicción de los nitratos a cosecha de maíz en suelos de la Región Pampeana**

**Helena Rimski-Korsakov, Carina R. Alvarez, Mónica B. Rodríguez y Raúl S. Lavado**

Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

*rimski@agro.uba.ar*

Los nitratos del suelo participan en diferentes procesos a lo largo de los ciclos agrícolas. Como es conocido, pueden ser absorbidos por las raíces, inmovilizados por la microflora del suelo o pueden perderse del sistema suelo - planta. Una de las pérdidas más importantes de nitratos es la lixiviación o lavado. Ello ocurre cuando las precipitaciones son suficientes para desplazarlos a una profundidad mayor que la explorada por las raíces, pudiendo alcanzar las capas freáticas. La lixiviación de nitratos tiene consecuencias ambientales y económicas negativas. Entre otras cosas, su presencia puede ser perjudicial para la salud, cuando en el agua de bebida se exceden las concentraciones establecidas. Por otra parte, el fertilizante que no es aprovechado por los cultivos representa una pérdida económica para el productor agropecuario.

Las pérdidas por lixiviación pueden ser importantes cuando la dosis de fertilizantes nitrogenados se encuentra por encima de los requerimientos del cultivo (sobrefertilización), o cuando la oferta de nitratos y la demanda del cultivo están desfasadas en el tiempo. Desde el punto de vista tecnológico, estas pérdidas se pueden minimizar optimizando la dosis y momento de aplicación del fertilizante. Esto se logra utilizando métodos de diagnóstico apropiados para calcular la dosis a aplicar y realizando la aplicación en el momento más cercano a la máxima demanda del cultivo. En el caso del maíz este momento es el de 6 hojas expandidas (estado V6). Una vez tomadas dichas medidas, la prevención de pérdidas por lavado durante el ciclo del cultivo es difícil de llevar a la práctica por ser un proceso altamente dependiente de las precipitaciones que ocurran en ese período.

## Los nitratos a cosecha o nitratos residuales

Luego de la cosecha del cultivo, pueden quedar en el suelo nitratos que no fueron aprovechados por el mismo. Estos nitratos remanentes son llamados *nitratos residuales* (Figura 1), y también son susceptibles de lixiviarse, especialmente durante el periodo de barbecho que se inicia al término del cultivo de maíz, y se caracteriza por precipitaciones otoñales importantes y baja evapotranspiración. Se consideran nitratos residuales los que se encuentran hasta 150 cm de profundidad a la cosecha del cultivo. Generalmente, la concentración de estos nitratos es baja, ya que los cultivos son grandes demandantes de este nutriente. Sin embargo, dichas concentraciones resultan elevadas si las dosis de fertilización son excesivas o el cultivo fertilizado no alcanzó el rendimiento previsto, por ejemplo por un estrés hídrico.

El conocimiento de la cantidad de nitratos residuales que quedan en el suelo después de la cosecha es importante, ya que permite a los productores implementar estrategias de manejo tendientes a disminuir las pérdidas por lixiviación. Las condiciones que generan situaciones de alto riesgo de lixiviación se resumen en:

<i><b>Durante el cultivo de maíz</b></i>	<i><b>Durante el barbecho (postcosecha)</b></i>
Aplicaciones excesivas de fertilizante	
Suelos con alta conductividad hidráulica	
Aplicaciones tempranas de fertilizante	Rendimiento menor al esperado
Precipitaciones intensas en los primeros estadíos	Altas precipitaciones durante el barbecho otoño invernal
	Barbecho limpio

## Modelos de simulación

Las investigaciones sobre temas de suelos y agricultura, así como ambientales, se enfrentan a problemáticas cada vez más complejas y específicas. El uso de herramientas más potentes y precisas para el análisis de las variables y procesos que intervienen en las mismas, pasa a ser

fundamental. En tal sentido, las innovaciones ocurridas en el área informática permitieron el desarrollo de modelos sofisticados, que integran un gran número de variables relacionadas con las características de cada sistema. Precisamente, los modelos predictivos y de simulación, cuyo uso está ampliamente difundido, permiten generar rápidamente análisis a corto o largo plazo, reduciendo la realización de estudios directos que requieren gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

Un ejemplo de ellos es el NLEAP, *Nitrate Leaching and Economic Analysis Package* (Follett et al., 1991). Este modelo fue desarrollado en Estados Unidos con el fin de estimar la lixiviación de nitratos asociada con diferentes prácticas agrícolas. Además, realiza simulaciones de diferentes procesos para llegar a los valores de lixiviación. Algunos de ellos son: la absorción de nitrógeno (N) por los cultivos, las pérdidas por volatilización y los nitratos residuales a cosecha.

Hasta el momento, las aplicaciones más importantes del modelo NLEAP, en su país de origen y otros, han sido:

- Determinación de estrategias de manejo tendientes a la minimizar el riesgo de lixiviación sin reducir los rendimientos del cultivo. Por ejemplo fue utilizado para determinar los momentos del año en que se incrementa el riesgo de lixiviación, para planificar la estrategia más adecuada de fertilización y otras técnicas de manejo del N (Shaffer et al., 1994a).
- Detección de áreas de alto riesgo de contaminación de acuíferos por el uso de fertilizantes, mediante estimaciones a largo plazo de la lixiviación de nitratos en extensas áreas, en conjunto con datos de sistema de cultivos, suelo y clima (Shaffer et al., 1993; 1994b).
- Evaluación del impacto de diferentes alternativas de manejo sobre la lixiviación, como la aplicación de dosis de fertilización variables en el cultivo de trigo (Ersahin, 2001), dosis, momento óptimo de fertilización y cronograma de riego en tomate (Ersahin y Karaman, 2001; Karaman et al., 2005), lechuga, papa, cebada y colza (Delgado et al., 2000).

## Objetivos del trabajo

En un trabajo local reciente (Rimski-Korsakov et al., 2004), se informó que en suelos cultivados con maíz, en la Pampa Ondulada, los nitratos residuales se acumularon en los años secos y se perdieron por lixiviación en los períodos postcosecha lluviosos. En base a esta información, el objetivo del presente trabajo fue determinar la aptitud del modelo Nleap para simular los nitratos residuales a cosecha de maíz en siembra directa. Si el modelo logra una buena predicción, se podrán determinar fácilmente las condiciones que llevan a una acumulación de nitratos residuales. De este modo, se podrán implementar alternativas técnicas para minimizar la pérdida de los mismos durante el barbecho otoño-invernal.

## Metodología utilizada

Las simulaciones con el modelo Nleap se realizaron en base a datos de seis ensayos de campo, desarrollados en cinco campañas consecutivas de maíz bajo siembra directa y fertilizado con diferentes dosis de N aplicado como urea (Tabla 1).

**Tabla 1:** Campañas y ubicación de los ensayos, precipitaciones registradas durante en ciclo de cultivo y dosis de fertilización nitrogenada.

Campaña	Sitio	Lluvias (mm)	Dosis de N (kg N ha <sup>-1</sup> )
98/99	Salto	714	0, 120, 180
99/00	Salto	389	0, 120, 180
00/01	Alberti	648	110, 160
00/01	Pergamino	935	130, 160
01/02	Alberti	616	0, 70, 140, 250
02/03	Alberti	887	0, 60, 106

En la Tabla 2, se enumeran algunas de las variables requeridas por el modelo y los rangos observados en los diferentes ensayos.

**Tabla 2:** Rangos de materia orgánica, nitratos al inicio de la simulación (de 0-33 y 33-150 cm), pH, rendimientos del maíz y fechas de siembra y cosecha de los ensayos, utilizados para la simulación.

Variable requerida	Unidades	Rango
Materia orgánica	%	2.5-2.9
N-NO <sub>3</sub> de 0-33 cm	kg N-NO <sub>3</sub> ha <sup>-1</sup>	17.5 - 45.3
N-NO <sub>3</sub> de 33-150 cm	kg N-NO <sub>3</sub> ha <sup>-1</sup>	25.8 - 50.6
pH		5.4 - 6.8
Rendimiento maíz	t ha <sup>-1</sup>	7.7-14.6
Fecha de siembra		2/9 -15/10
Fecha de cosecha		15/2 - 1/4

Otras variables, como las climáticas (precipitaciones, días con lluvias, temperatura y evapotranspiración), se ingresaron en el modelo en la forma de dato mensual. La evapotranspiración se calculó utilizando el método de Penman.

En todos los ensayos se contó con los valores de nitratos residuales a cosecha hasta 150 cm de profundidad. Estos fueron correlacionados con los simulados por el modelo.

## Resultados y discusión

El rango de nitratos residuales medidos varió entre 26 y 92 kg N ha<sup>-1</sup>, correspondientes a todas las campañas, sitios y dosis de fertilización analizadas. La correlación entre los valores de nitratos residuales simulados por el modelo y los medidos a campo fue significativa ( $p < 0.001$ ), aunque el ajuste resultó bajo ( $R^2 = 0.533$ ), y la ordenada al origen fue diferente de 0 y la pendiente diferente de 1 ( $y = 0.5101 x + 21.049$ ). La falta de ajuste se debió a que dos de los tratamientos se apartaron considerablemente de la recta 1:1, presentando diferencias mayores a 15 kg ha<sup>-1</sup>, entre valores de nitratos residuales simulados y observados. Estos dos casos fueron tratamientos con niveles de fertilización más altos, 180 y 250 kg N ha<sup>-1</sup>. En estos puntos, el modelo sobrestimó el valor de nitratos residuales (38 y 76 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente).

Analizando las razones de las fallas registradas, se observó que en ambos tratamientos el modelo subestimó la absorción de N por el cultivo. El modelo calcula la absorción teniendo en cuenta el rendimiento del cultivo y aplicando un coeficiente constante de N absorbido por tonelada de grano producido, igual a 21.3 kg N/t grano. Sin embargo, los datos de absorción de N en planta entera que se midieron en este estudio, no coinciden con lo propuesto por el modelo, siendo el rango registrado de 14.6 a 24.1 kg N/t grano producido. Cuando las dosis de fertilización fueron bajas o en los testigos (no fertilizados), los valores de absorción de N se encontraron por debajo de los propuestos por el modelo. Contrariamente, cuando las dosis fueron elevadas, los valores de absorción de N se encontraron por encima de los suministrados por el modelo. Coincidentemente, otros trabajos realizados en la región también mostraron variaciones en el requerimiento de N por tonelada de grano producido (Salas et al., 2002; Steinbach et al., 2004).

Por otro lado, también se evaluó el grado de confiabilidad del modelo en la simulación de las pérdidas por volatilización, ya que posee la opción para estimar este tipo de pérdidas. En nuestro caso, las estimó como inexistentes, lo que provocó que la predicción fuera deficiente ya que mediciones directas de la volatilización en algunos de los ensayos, mostraron que estas pérdidas podían llegar hasta el 27% del fertilizante aplicado (datos no publicados). Adicionalmente, trabajos locales donde se evaluó la volatilización de manera directa en maíz, muestran una importancia variable de esta vía de pérdida según la fuente, momento y forma de aplicación del fertilizante, así como de la dosis aplicada. La volatilización medida en estos ensayos osciló entre 3 y 21 % del fertilizante aplicado (Rodríguez, 2004; Fontanetto, 2004).

En consecuencia, el modelo subestima la absorción y la volatilización, en las dosis más altas y, por ende, predice valores de nitratos residuales más altos que los medidos. Cuando se descontaron, en los dos tratamientos con alta dosis de fertilización, las cantidades de N subestimadas por el modelo (N absorbido y volatilizado), al valor de los residuales, las diferencias entre simulados y observados se acercaron a cero. Es decir, en nuestras condiciones el modelo no simula adecuadamente los nitratos residuales a cosecha cuando las dosis de fertilización nitrogenada son muy elevadas. Precisamente, realizando la simulación con las dosis comunes para la región, la relación

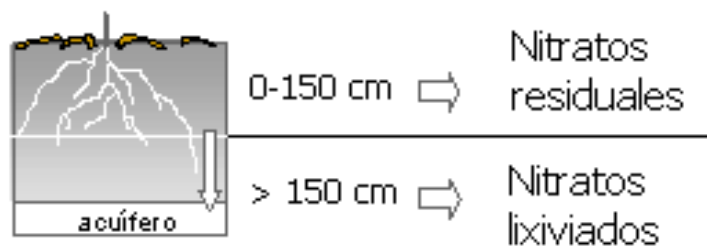
mostró un ajuste muy significativo ( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.97$ ), no difiriendo la ordenada al origen de 0 y la pendiente de 1 (Figura 2).

### Conclusión y estrategias para disminuir los riesgos de lixiviación

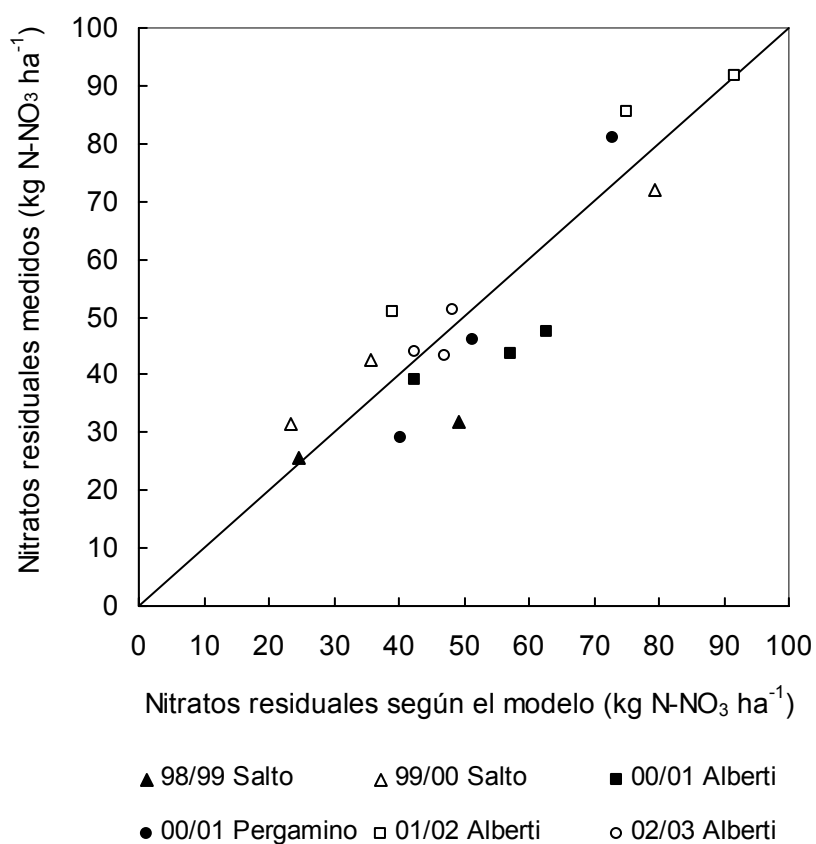
El modelo Nleap simuló adecuadamente las situaciones ensayadas, que presentaron grandes variaciones climáticas y de suelos, cuando se utilizaron dosis normales de fertilización nitrogenada. Por este motivo, el modelo es útil como herramienta para aumentar la eficiencia de la fertilización a través del manejo de los nitratos residuales.

La acumulación de nitratos residuales, puede ser regulada a través de la realización de barbechos verdes (enmalezados o con cultivos de cobertura) o bien, sembrando un cultivo de cosecha de invierno (como trigo). De esta forma, los nitratos residuales pueden ser absorbidos por el cultivo existente. Si es un cultivo con valor económico, pueden incrementar su rendimiento y generar mayores ingresos al productor. Si se tratase de un cultivo de cobertura o malezas, el N residual no se lixivia, permanece dentro del sistema como residuo orgánico y con el tiempo se va transformando en nitratos. En cierta forma, esta estrategia constituye una alternativa para aumentar la residualidad del fertilizante nitrogenado, convirtiendo los nitratos, muy móviles en suelo, en N orgánico que se aprovechará en el futuro. Las estrategias para disminuir las pérdidas de nitratos por lixiviación durante el cultivo de maíz y pos-cosecha del mismo, se pueden observar en el siguiente esquema:

Durante el cultivo de maíz	Durante el barbecho (postcosecha)
Uso de modelos de diagnósticos ajustados a la zona	
Aplicaciones en V6, donde se da la máxima absorción de N	Dejar enmalezar el lote Utilizar cultivos de cobertura Realizar un cultivo de cosecha de ciclo invernal



**Figura 1.** Esquema de nitratos residuales y lixiviados a cosecha del cultivo de maíz.



**Figura 2.** Nitratos residuales simulados por el modelos vs. nitratos residuales medidos. No se incluyen las dosis altas de fertilización (mayores de  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

## Referencias



- Delgado JA, Follett RF y Shaffer MJ. 2000. Simulation of nitrate-nitrogen dynamics for cropping systems with different rooting depths. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1050-1054.
- Ersahin S y Karaman MR. 2001. Estimating potential nitrate leaching in nitrogen fertilized and irrigated tomato using the computer model NLEAP. *Agricultural Water Management* 51: 1-12.
- Ersahin S. 2001. Assessment of spatial variability in nitrate leaching to reduce nitrogen fertilizers impact on water quality. *Agricultural Water Management* 48: 179-189.
- Follet RF, Keeney DR y Cruse RM. (Eds.). 1991. *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. 357 p.
- Fontanetto, HM. 2004. ¿Por qué se pierde el nitrógeno en fertilizaciones superficiales? *Boletín INTA Informa*, Número 290, <http://www.inta.gov.ar/info/intainfo/ant/2004/290.htm>.
- Karaman MR, Saltali K, Ersahin S, Gülec H y Derici MR. 2005. Modeling nitrogen uptake and potential nitrate leaching under different irrigation programs in nitrogen-fertilized tomato using the computer program NLEAP. *Environmental Monitoring and Assessment* 101: 249-259
- Rimski-Korsakov H, Rubio G y Lavado RS. 2004. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the Pampas Region, Argentina. *Agricultural Water Management* 65: 83-94.
- Rodríguez M. 2004. Fertilización sustentable: fuentes y formas de aplicación de nitrógeno. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná :504.
- Salas J, Alvarez R y Alvarez CR. 2002. Aporte de nitrógeno al maíz desde los pooles del suelo en la Pampa Ondulada bajo distintos sistemas de labranzas. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn: 99.
- Shaffer MJ, Brodahl MK y Wylie BK. 1993. Integration and use of the Nitrate Leaching and Economic Analysis Package (NLEAP) in the GIS environment. En: *Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90's*. 1993, Fort Collins, Colorado. pp: 528-535.

- Shaffer MJ, Wylie BK, Follett RF y Bartling PNS. 1994a. Using climate/weather data with the NLEAP model to manage soil fertility and nitrate leaching. *Agricultural and Forest Meteorology* 69:111-123.
- Shaffer MJ, Wylie BK y Brodahl MK. 1994b. NLEAP as a predictive tool for regional nitrate leaching in Colorado. En: *Great Plains Soil Fertility Conference Proceedings*. 1994, Denver, Colorado. pp. 197-202.
- Steinbach HS, Alvarez R y Valente CR. 2004. Balance between mineralization and immobilization of nitrogen as affected by soil mineral nitrogen level. *Agrochimica*, XLVIII: 204-212.