

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ PARA EL SUR DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

ESPOSITO¹, G.; CASTILLO¹, C.; BALBOA², R.

RESUMEN

En el Departamento Río Cuarto (Argentina), se elaboró, calibró y validó un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz, *Zea mays* (L.). La calibración se realizó entre 1994 y 1999, con 6 experimentos anuales. Entre 1999 y el 2002, se procedió a validar el modelo desarrollado. En la calibración se probaron 3 dosis fijas de nitrógeno (0,37 y 74 kg N ha⁻¹) y se empleó un diseño en bloques completos aleatorios con tres repeticiones. En la etapa de validación, se probó la dosis recomendada por el modelo contra un testigo sin fertilizar y el doble de la dosis recomendada. Finalmente se verificó el grado de ajuste entre valores observados y simulados del factor de mineralización de la materia orgánica y del rendimiento. Al estado fenológico de V₆, se encontraron ajustes aceptables entre la respuesta a la fertilización y la disponibilidad hídrica del perfil presentes en 100 cm y entre la respuesta y la disponibilidad de N-NO₃⁻ presentes en 40 cm del suelo. Con ello se elaboró el modelo de diagnóstico que al final de la etapa de validación arrojó un índice de coincidencia entre los valores observados y simulados de 91,56 en el factor de mineralización del N del suelo y de 91,75 para el rendimiento del cultivo.

Palabras clave: *nutrición, siembra directa, disponibilidad hídrica, modelo.*

¹ Departamento de Producción Vegetal. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba. Argentina. (5800). Ruta 8 km 601. Correo electrónico: gesposito@ayv.unrc.edu.ar

² Técnico de campo. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba. Argentina.

ABSTRACT

CALIBRATION AND VALIDATION OF A METHOD FOR THE ASSESSMENT OF NITROGEN FERTILIZATION OF CORN IN SOUTHERN CORDOBA (ARGENTINA)

A model for the assessment of nitrogen (N) fertilization in corn *Zea mays* (L.) was developed, calibrated and validated for the region of Rio Cuarto (Argentina). The model was calibrated using data of a six-year (1994-1999) field experiment at Rio Cuarto (Argentina). The experiment consisted of corn grown with three levels of N (0, 37 y 74 kg N ha⁻¹) with a three replicated complete randomized block design. Then, the calibrated model was validated using data of a three-year experiment (1999-2002) with three levels of N: 0 kg of N ha⁻¹, the N amount recommended by the model and twice the recommended dose. In the validation process, measured and simulated yields and organic matter mineralization rates were compared. At the stage of V₆, the model simulated adequately the response of the crop to N fertilization, to available water in the 1 m depth and to available N-NO₃⁻ in the depth of 0.4 m. The agreement indexes were 0.915 and 0.917 for the soil N mineralization factor and crop yield respectively.

Key words: *crop nutrition, direct seeding, available water, model.*

INTRODUCCIÓN

El maíz es un cereal de gran importancia en la República Argentina y, en la campaña 2004/05, se destinaron un total de 3,5 millones de hectáreas. La provincia de Córdoba es la de mayor importancia en superficie sembrada, con casi 1 millón de hectáreas (Umarán, 2005). El Departamento Río Cuarto es el de mayor área sembrada con maíz dentro de Córdoba (REAG, 1999). Espósito *et al.* (1997) indicaron que la principal dificultad que enfrentaban los productores a la hora de emplear la siembra directa en el sur de Córdoba era la de contar con diagnósticos eficientes de las necesidades de fertilización nitrogenada.

Los métodos de diagnóstico desarrollados para el cultivo de maíz incluyen el análisis de suelo en presiembra y al estado de 5-6 hojas, y el

análisis de la planta en estadios tempranos y avanzados de desarrollo (García, 2000). Muy pocos modelos de fertilización consideran a las variables climáticas para realizar los diagnósticos, pero muchos investigadores plantean la importancia de las interacciones del ambiente en la respuesta a la fertilización (Salvagiotti *et al.*, 2002). La oferta de nitrógeno del suelo, que compensa y balancea la demanda del cultivo y define la necesidad de fertilizar, es afectada por factores climáticos de ocurrencia aleatoria como la humedad y la temperatura. Además, estos definen el rendimiento y, por lo tanto, la demanda de N (Melgar, 2002).

Para un correcto diagnóstico de las necesidades de nitrógeno Schmidt *et al.* (2002), señalaron la importancia de incorporar la disponibilidad hídrica y la potencialidad de lixiviación de N, además del contenido de materia orgánica. La humedad edáfica al momento de la siembra presenta relación con la respuesta a la fertilización de los cultivos en ambientes subhúmedos, tal cual lo planteó Bono *et al.* (1999) para el girasol en Anguil (Argentina) y Espósito *et al.* (2002) en trigo en Río Cuarto (Argentina).

También se ha utilizado la disponibilidad de N-NO_3^- del suelo para los diagnósticos de fertilización nitrogenada. En Wisconsin USA, se ha observado que la precisión del diagnóstico dependió de la temperatura media del aire en los 60 días postsiembra, y fue mayor en los sitios con alto potencial de rendimiento, pero no hubo correlación con las precipitaciones (Andraski and Bundy, 2002). En la Argentina, se ha señalado que el N-NO_3^- en V_6 es un buen predictor de la respuesta a la fertilización en la región de Balcarce, indicando valores umbrales de 17 y 27 mg kg^{-1} (Sainz Rozas *et al.*, 2000).

A nivel del uso de los modelos de simulación, Wallach *et al.* (2001) indicaron que es deseable que los mismos empleen el menor número de parámetros posibles para disminuir los términos de error y facilitar su empleo en la toma de decisiones. Estos antecedentes permiten establecer que la respuesta en rendimiento a la fertilización con nitrógeno está determinada por la condición hídrica y nutricional del cultivo en estadios tempranos de desarrollo. Además al ser el agua el principal factor determinante de la producción en ambientes subhúmedos, existe una relación de dependencia entre el requerimiento de nitrógeno y la disponibilidad hídrica al momento de la fertilización. De este modo el objetivo de este trabajo, fue calibrar y validar un modelo de diagnóstico para la fertilización nitrogenada del maíz en el Sur de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODO

Etapa de calibración

Se realizaron 6 ensayos de experimentación en cada una de las campañas agrícolas 1994/95, 1995/96, 1996/97 y 1998/99, en campos de productores ubicados en el Departamento Río Cuarto, Córdoba Argentina.

La ubicación de los experimentos se realizó en diferentes unidades de tierra según la zonificación de suelos del Departamento Río Cuarto realizada por Cantero *et al.* (1999). Las unidades empleadas fueron: noreste de Río Cuarto, Fajas Medanosas, este de Baigorria, Carnerillo, Cuatro Vientos y San Basilio. La selección de estos ambientes respondió a la necesidad de contar con situaciones contrastantes de precipitación, materia orgánica, fósforo y nitratos, tal cual se puede apreciar en la Tabla 1.

Caracterización climática del lugar

Esta región se caracteriza por poseer un régimen climático templado subhúmedo con invierno seco. El régimen de precipitaciones presenta una distribución anual del tipo monzónico con un 80% de las lluvias concentradas en el período primavera estival, la precipitación media anual es de 801 mm (Seiler *et al.*, 1995).

Durante el desarrollo de la experiencia, se registraron en promedio 588 mm, entre siembra y madurez fisiológica del maíz y los valores extremos fueron de 800 y 355 mm (Tabla 1). Todos los ensayos fueron realizados empleando el híbrido DK 762 (Monsanto SA) y siguiendo un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones espaciales, donde se testearon tres niveles de nitrógeno: 0 - 37 y 74 kg N ha⁻¹, aplicado como urea (NPK, 46-0-0) incorporado al suelo en el estadio de sexta hoja. Las dosis de nitrógeno seleccionadas respondieron a la intención de probar un testigo sin fertilizar (para cuantificar la respuesta a la fertilización), la dosis más comúnmente empleada por los productores involucrados en el experimento (37 kg N ha⁻¹) y el doble de ésta. El tamaño de cada parcela fue de 15 m de ancho por 50 m de largo.

Los ensayos fueron conducidos mediante la técnica de siembra directa y fertilizados al momento de la siembra con 120 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (0-46-0), con el objetivo de minimizar efectos en el cultivo por deficiencias debidas al fósforo. Se realizaron controles químicos necesarios para mantener los ensayos libres de plagas y enfermedades.

Tabla 1: Características ambientales de los sitios de experimentación (valores máximos y mínimos entre 1994/99)

	NE Río Cuarto	Fajas medanosas	San Basilio	Carnerillo	Este Baigorria	Cuatro Vientos
Tipo de suelo	Haplustol típico	Haplustol údico	Argiustol údico	Haplustol éntico	Haplustol éntico	Haplustol éntico
Textura	Franca	Franca arenosa	Franca	Arenosa franca	Franca arenosa	Arenosa franca
Pp. siembra-cosecha	514-800	567-642	398-597	403-701	355-711	485-627
Siembra	17-26 / 10	9-19 / 10	10-24 / 10	18-28 / 10	19-27 / 10	11-26 / 10
Mat. Org. (%) 20 cm	2,2-2,8	1,6-2,2	1,9-2,5	1,4-1,8	1,2-1,6	1,1-2,8
Mat. Org. (%) 40 cm	1,3-1,6	1,1-1,4	1,2-1,5	0,8-1,0	0,6-1,2	0,6-1,6
Fosforo 20 cm	14-28 ppm	10-21 ppm	10-23 ppm	6-17 ppm	3-12 ppm	6-46 ppm
Nitratos 040 cm	75-120 ppm	67-86 ppm	56-89 ppm	56-220 ppm	51-124 ppm	44-88 ppm

Pp: precipitación entre siembra y cosecha (mm). Mat. Org.: materia orgánica

Durante la etapa de calibración y al momento de la siembra, se cuantificó en las profundidades 0-20 cm y 20-40 cm, el contenido de materia orgánica (Page, *et al.* 1982) y densidad aparente (Klute, 1986). Al estado de V_6 se determinó el contenido de nitratos 0-20 cm y 20-40 cm (Page, *et al.* 1982) y el agua disponible, medida como la diferencia entre la lámina total de agua del suelo en los primeros 100 cm y el contenido de humedad a 15 bares de succión. El rendimiento del cultivo se evaluó mediante cosecha mecánica de la totalidad de cada parcela. Se estableció el balance hídrico del cultivo mediante la suma algebraica de las diferencias entre las precipitaciones decádicas registradas en cada sitio experimental con la evapotranspiración potencial de referencia para Río Cuarto, calculada por el Área de Climatología de la Universidad Nacional de Río Cuarto. De este modo, se obtuvieron los siguientes análisis: balance hídrico total (entre siembra y madurez fisiológica), balance hídrico en R_1 (intervalo de +/-15 días) y balance hídrico previo a la fertilización (desde 1 mes previo a la siembra y hasta V_6).

Etapa de validación

Con la información recopilada en la etapa de calibración, se procedió a confeccionar un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz (Anexo 1) Para validar los resultados obtenidos por éste, se realizaron 8 ensayos de experimentación a campo durante las campañas 1999/2000, 2000/2001 y 2001/2002. En esta etapa, se implantaron algunos ensayos en las mismas unidades de tierra señaladas anteriormente y otros fuera de éstas, pero dentro del Departamento Río Cuarto para ampliar la zona de validación del modelo. El tamaño, diseño experimental, fertilización fosfórica de base, controles, método de siembra y todas las determinaciones realizadas en la validación fueron idénticos a las mencionadas en la etapa de calibración. En el estadio de V_6 se realizaron los siguientes tratamientos: testigo sin fertilizar, dosis recomendada por el modelo de N (DR) y el doble de la dosis recomendada de N (2DR).

Como se asumió que los rendimientos del cultivo expresan la síntesis entre la oferta y demanda ambiental de N, se procedió a validar el modelo a partir de la producción de grano observada a campo y la simulada por el modelo. Además la validación se realizó a través del aporte de nitrógeno por parte del suelo vía mineralización, para ello y según el rendimiento de los testigos sin fertilizar, se determinó un factor de mineralización (FM) observado a campo de acuerdo con la ecuación 1, que considera un re-

querimiento aproximado de 22 kg de N tn⁻¹ de grano producida. Este valor fue luego validado con el FM simulado por el modelo.

FM (%), Factor de mineralización observado.

$$FM(\%) = \frac{(Nreq - NNO3V_6)}{Ntotal} 100 \quad [1]$$

Nreq, kg de N obtenidos de la relación 22kg N/ton grano, utilizando el rendimiento de parcelas testigo.

NNO3V₆, kg de N presentes como NO₃⁻ en V₆

Ntotal, kg de N total del suelo.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i + O_i)^2} \right] \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (2)$$

D, índice de coincidencia. *N*, número de casos. *P_i*, datos simulados. *O_i*, datos observados.

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

RMSE, raíz cuadrada media del error. *N*, número de casos. *P_i*, datos simulados. *O_i*, datos observados.

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante análisis de regresión lineal, el índice de coincidencia *D* (ecuación 2), la raíz cuadrada media del error *RSME* (ecuación 3) y su relación porcentual con el rendimiento promedio %*RSME*, según Willmott (1982), que permite establecer en qué medida los valores observados se aproximan a los simulados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa de calibración

Balance hídrico total

Como puede apreciarse en la Figura 1, el rendimiento se correlacionó en forma polinómica positiva con el balance hídrico total en los tres nive-

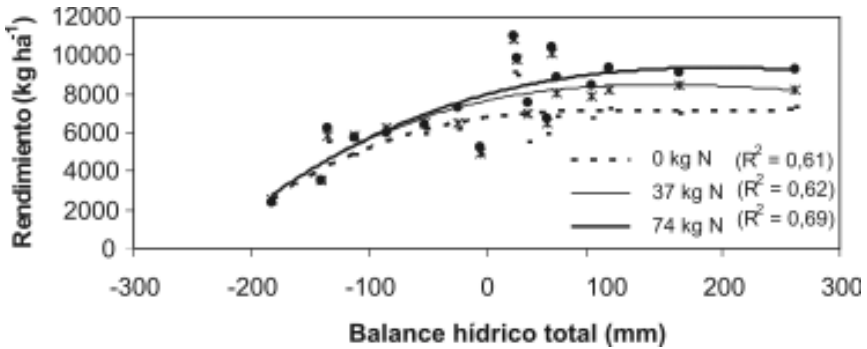


Figura 1: Rendimiento del cultivo de acuerdo el balance hídrico total. El balance hídrico total (diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración de referencia entre siembra y madurez fisiológica). $0 \text{ kg N ha}^{-1} y = 6655,60 + 12,18 x - 0,04 x^2$ ($R^2: 0,61$ valor p. 0,03) $\sim 37 \text{ kg N ha}^{-1} y = 7579,18 + 15,25 x - 0,05 x^2$ ($R^2: 0,2$ valor p. 0,03) $\sim 74 \text{ kg N ha}^{-1} y = 7923,85 + 17,84 x - 0,05 x^2$ ($R^2: 0,69$ valor p. 0,03).

les de fertilización probados. Es de destacar que las producciones máximas obtenidas fueron aumentando a medida que se incrementó la dosis de nitrógeno. Esta situación permite interpretar que, sólo con balances hídricos totales entre 0 y +250 mm, la fertilización nitrogenada mostró diferencias entre las dosis probadas. Ello puede explicarse dado que la producción de maíz crece a medida que aumenta la oferta hídrica hasta un punto de no respuesta, donde otros factores limitan la producción (Liebig 1840). Estos resultados concuerdan con los observados por Álvarez y Álvarez (2003) en cuanto a la relación entre el balance hídrico total y la eficiencia en el uso del nitrógeno, aunque estos autores encontraron mayores niveles de eficiencia, posiblemente debido a las diferencias de calidad de ambiente para la producción del maíz que hay entre Pergamino, zona núcleo maicera (62 y 41 kg grano por kg N) y Río Cuarto (42 y 10 kg grano por kg N), para balances hídricos totales de +36 mm y de -144 mm.

Balance hídrico en floración

En floración (Figura 2) la relación encontrada, entre el balance hídrico en R_1 y el rendimiento fue lineal debido a que coincide con el período crítico del cultivo, donde una elevada tasa de crecimiento favorece la producción (Espósito, 2002; Otegui y Andrade, 2000). Los mayores rendi-

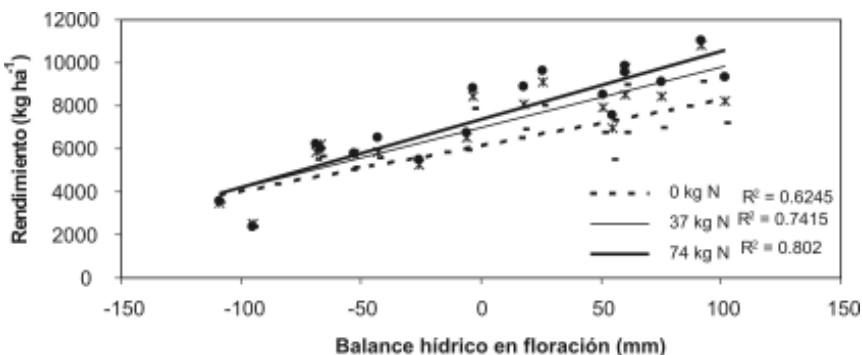


Figura 2: Rendimiento del cultivo de acuerdo el balance hídrico en floración. La cantidad de nitrógeno se refiere a dosis por hectárea. Balance hídrico en floración (diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración para el periodo +/- 30 días centrado en floración) $0 \text{ kg ha}^{-1} y = 6157,89 + 20,93 x$ ($R^2: 0,62$ valor $p. <0,0001$) $\sim 37 \text{ kg ha}^{-1} y = 6990,65 + 27,80 x$ ($R^2: 0,74$ valor $p. <0,0001$) $\sim 74 \text{ kg ha}^{-1} y = 7387,55 + 31,65 x$ ($R^2: 0,80$ valor $p. <0,0001$).

mientos y las mayores diferencias entre dosis de nitrógeno fueron encontrados con balance hídricos en R_1 entre 0 y +100 mm.

Estos resultados coinciden con los encontrados por Pattey *et al.* (2001) y Abdirashid *et al.* (2000), en cuanto a que las condiciones climáticas juegan un rol importante en la regulación de la dinámica del nitrógeno en el suelo. Mientras que contradicen lo propuesto por Calviño *et al.* (2003), los cuales encontraron que el rendimiento del maíz se relacionó en forma curvilínea con la lluvia 20 días pre y 30 días post floración. Esta diferencia de comportamiento puede explicarse porque estos autores realizaron sus estudios en la zona de Pergamino con un régimen hídrico más húmedo que en el Sur Oeste de Córdoba.

Balance hídrico previo a la fertilización

En la Figura 3, se observa una relación polinómica positiva entre la respuesta a la fertilización y el balance hídrico previo a V_6 . Ello concuerda con lo propuesto por Katsvairo *et al.* (2003) en Nueva York (EEUU), los cuales encontraron relaciones positivas entre el crecimiento del maíz hasta V_6 y la respuesta a la fertilización. A nivel nacional, Sadras y Calviño (2001) también han hallado una relación positiva entre la condición hídrica

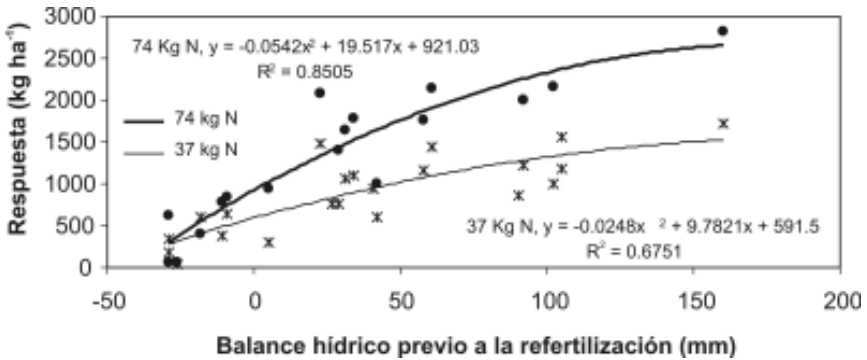


Figura 3: Respuesta a la fertilización según el Balance hídrico previo a la fertilización.

Respuesta, medida como diferencia del rendimiento de cada dosis con el testigo sin fertilizar.

El balance hídrico previo a la fertilización se calculó como diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración para el periodo 30 días previos a la siembra y la 6^a hoja del cultivo. (74 kg N, valor p: 0,044; 37 kg N, valor p: 0,041).

del período desde siembra hasta 40 días antes de la floración y el rendimiento.

Agua disponible en el suelo a 1 m de profundidad en V₆

Se puede apreciar en la Figura 4 una relación lineal entre la respuesta a la fertilización con el agua disponible en el suelo en V₆. Estos resultados son equivalentes a los obtenidos por Andresen *et al.* (2001) al momento de la siembra del maíz. De este modo, una mayor disponibilidad hídrica en V₆ favorece la absorción del nitrógeno aplicado y la tasa de crecimiento del cultivo en estadios posteriores que se traducen en un mayor rendimiento (Espósito 2002).

Nitratos presentes en V₆ en los primeros 40 cm de profundidad

En contraposición con lo propuesto por Maddoni *et al.* (2003), los nitratos presentes en los primeros 40 cm del suelo en V₆ no mostraron relación alguna con la respuesta a la fertilización, dado que el ajuste lineal obtenido presentó un R²=0,04 y con un valor p de 0,2437. No obstante ello, estos resultados fueron reagrupados según el balance hídrico ocurrido en

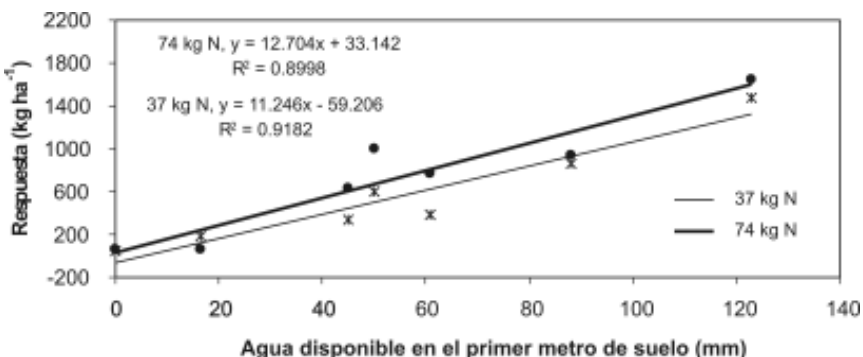


Figura 4: Respuesta a la fertilización según el agua disponible en 1 metro de suelo. Respuesta, medida como diferencia del rendimiento de cada dosis con el testigo sin fertilizar.

Agua disponible en 6^o hoja del cultivo, medida como diferencia entre contenido volumétrico total de agua del suelo y el contenido a 15 bares de succión. (74 kg N, valor p: 0,0011; 37 kg N, valor p: 0,0007).

la etapa previa a la fertilización, en balances hídricos negativos (Figura 5) y positivos (Figura 6).

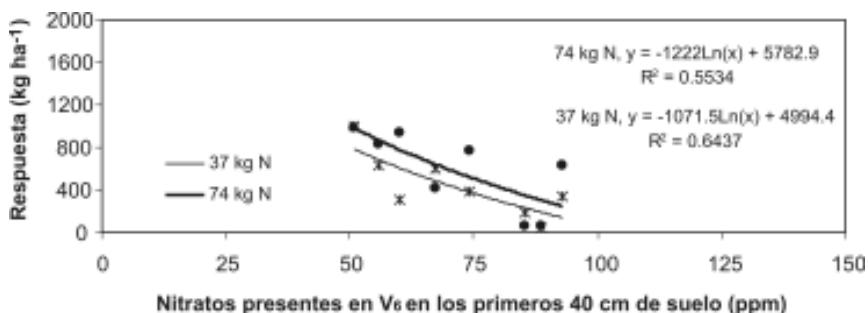


Figura 5: Respuesta a la fertilización según los nitratos presentes en los primeros 40 cm de suelo en situaciones de Balance hídrico negativo.

Respuesta medida como diferencia del rendimiento de cada dosis con el testigo sin fertilizar.

Balance hídrico previo a la fertilización medido como diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración para el periodo 30 días previos a la siembra y la 6^o hoja del cultivo. (74 kg N, valor p: 0,0385; 37 kg N, valor p: 0,022)

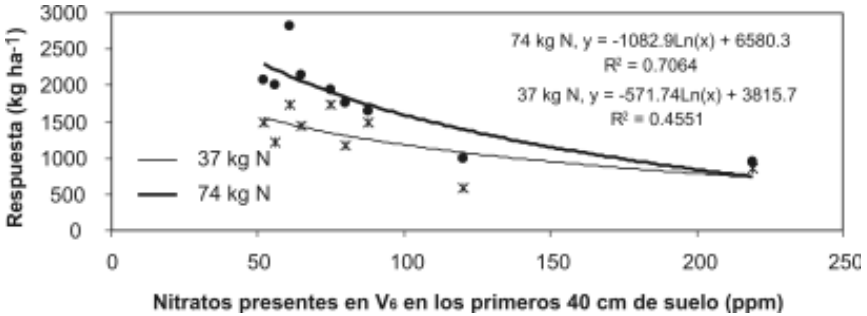


Figura 6: Respuesta a la fertilización según los nitratos presentes en los primeros 40 cm de suelo en situaciones de Balance hídrico positivo. Respuesta medida como diferencia del rendimiento de cada dosis con el testigo sin fertilizar.

Balance hídrico previo a la fertilización medido como diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración para el periodo 30 días previos a la siembra y la 6ª hoja del cultivo. (74 kg N, valor p: 0,01; 37 kg N, valor p: 0,05).

Con este arreglo se encontró un ajuste polinómico entre el nivel de nitratos en el suelo y la respuesta a la fertilización. En ambas figuras, se aprecia una tendencia negativa en la respuesta a la fertilización a medida que aumenta la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. En condiciones de balance hídrico negativo (Figura 5), el rango de nitratos presentes en el suelo varió entre los 50-90 ppm y la respuesta a la aplicación de nitrógeno disminuyó de 1000 a 0 kg ha⁻¹ respectivamente, sin observarse diferencias entre las dosis de N probadas. Con balance hídrico positivo (Figura 6), el rango de nitratos fue entre 50-220 ppm, la respuesta a la fertilización disminuyó desde 2800 a 1200 kg ha⁻¹ y se obtuvieron diferencias entre las dosis utilizadas (por debajo de 100 ppm).

Estos resultados concuerdan con los planteados por Scharf *et al.* (2002), en cuanto a que la aplicación de nitrógeno en estadios vegetativos tempranos es una técnica muy conveniente para evitar pérdidas por lixiviación y permite, además, contemplar el estado de crecimiento del maíz en la decisión de fertilizar.

Desarrollo del modelo

Con los resultados presentados en los gráficos precedentes, se consideró que la predicción de la respuesta a la fertilización estaba fuertemente

ligada, en primer lugar, a la disponibilidad hídrica en V_6 y, posteriormente, con la disponibilidad de nitrógeno, como nitratos, en los primeros 40 cm del suelo. Teniendo en cuenta que el maíz requiere aproximadamente 22 kg N ha⁻¹ por cada tonelada de grano a producir, el primer paso para cuantificar las dosis de N es definir cuál es el rendimiento potencial esperado en cada situación. Para determinarlo se realizó una correlación múltiple entre la producción de grano y el balance hídrico previo a la fertilización más el agua disponible en el suelo en V_6 . El ajuste permitió establecer la siguiente ecuación con una regresión lineal del 80,5 %.

$$\text{Rendimiento potencial} = 3428,09 + 45,95 * AD + 14,18 * BH$$

AD: agua disponible, medida como la diferencia entre la lámina total de agua del suelo en los primeros 100 cm y el contenido de humedad a 15 bares de succión.

BH: balance hídrico previo a la fertilización, calculado como la suma algebraica de las diferencias entre las precipitaciones decádicas y la evapotranspiración potencial de referencia para Río Cuarto, desde 1 mes previo a la siembra y hasta V_6 .

En los ambientes subhúmedos, este tipo de relaciones entre el rendimiento del maíz y la oferta hídrica en las primeras etapas de éste, presentan un mejor ajuste que en ambientes más húmedos donde el aporte del agua del suelo, previo al momento crítico, tiene una menor influencia en el rendimiento final (Espósito *et al.*, 2002).

Para el diagnóstico de la dosis a emplear, el modelo considera los aportes por los nitratos del suelo presentes en el estadio de V_6 en un 100%, más el aporte de la mineralización de la materia orgánica nativa. Para evaluar el factor de mineralización por emplear, se estableció una relación del mismo con el agua del suelo disponible en V_6 , la cual arrojó la siguiente ecuación con un R² del 77,65%.

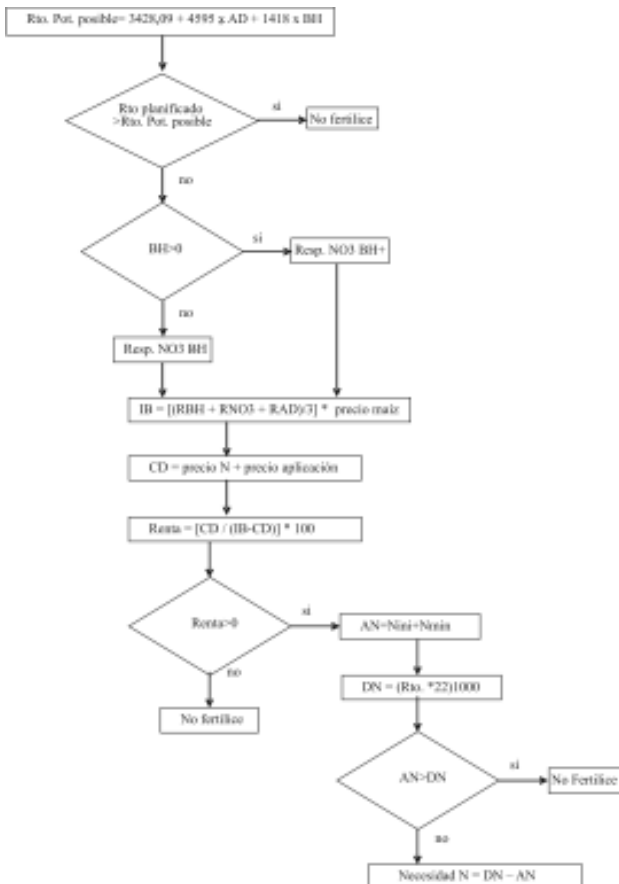
$$\text{Factor de mineralización (FM \%)} = -0,00000282 * AD^2 + 0,000602 * AD + 0,005006$$

En este sentido, Mahmoudjafari *et al.* (1997) señalaron que la tasa de mineralización está en función del contenido hídrico del suelo, el cual varía independientemente del contenido de materia orgánica. Finalmente, la dosis de nitrógeno por aplicar se establece como la diferencia entre la oferta de nitrógeno aportado por el suelo, como nitratos, más el mine-

realizado con el factor de mineralización (FM) por la materia orgánica y la demanda del cultivo a partir del rendimiento esperado (aproximadamente 22 kg N por ton grano por ha). Esto es un simple balance de nitrógeno, de acuerdo con el propuesto por Maddoni *et al.* (2003) y considerando en éste la oferta hídrica y nutricional de una situación particular.

En el Anexo 1 se puede apreciar el diagrama de flujo del modelo de diagnóstico desarrollado en la etapa de calibración (denominado NP-Zea), para una mayor comprensión de éste.

Anexo I: Diagrama de flujo Modelo de diagnóstico de N en maíz (NP-Zea)



Referencias del Anexo I

Rto. Planificado: rendimiento propuesto por el usuario del modelo como valor a obtener (kg ha^{-1}).

Rto. Pot. Posible: rendimiento potencial posible limitado por agua disponible en V_6 y balance hídrico previo a la fertilización (kg ha^{-1}).

AD: agua disponible en V_6 (mm).

BH: balance hídrico previo a la fertilización (mm).

Resp. NO3 BH+: respuesta a la fertilización por nitratos disponibles en V_6 en situación de balance hídrico previo a la fertilización positivo (kg ha^{-1}).

Resp. NO3 BH-: respuesta a la fertilización por nitratos disponibles en V_6 en situación de balance hídrico previo a la fertilización negativo (kg ha^{-1}).

IB: ingreso bruto por la fertilización nitrogenada ($\text{\$ ha}^{-1}$)

RBH: respuesta a la fertilización según el balance hídrico previo a la fertilización (kg ha^{-1}).

RNO3: respuesta a la fertilización según disponibilidad de nitratos en V_6 (kg ha^{-1}).

RAD: respuesta a la fertilización según agua disponible en V_6 (kg ha^{-1}).

Precio maíz: precio neto del maíz puesto en el establecimiento agropecuario ($\text{\$ kg}^{-1}$).

CD: costos directos de la fertilización.

Precio N: precio neto del fertilizante nitrogenado ($\text{\$ kg}^{-1}$).

Precio aplicación: costo de la aplicación del fertilizante en V_6 ($\text{\$ ha}^{-1}$)

Renta: rentabilidad de la fertilización (%).

AN: disponibilidad total de nitrógeno del suelo para el cultivo (kg N ha^{-1}).

Nini: disponibilidad de nitrógeno como nitratos en V_6 en los primeros 40 cm del suelo (kg N ha^{-1}).

Nmin: disponibilidad de nitrógeno por mineralización de la materia orgánica en los primeros 40 cm (kg N ha^{-1}).

DN: requerimiento de nitrógeno del maíz (kg N ha^{-1}).

Necesidad N: cantidad necesaria a fertilizar con nitrógeno (kg N ha^{-1}).

NO3 [0-20]: Contenido de nitratos en los primeros 20 cm de suelo en V_6 (ppm).

NO3 [20-40]: Contenido de nitratos en el intervalo 20-40 cm de suelo en V_6 (ppm).

PEA: peso específico aparente (tn m^{-3}).

MO: materia orgánica (%).

FM: factor de mineralización (%).

Ecuaciones del Anexo I

Resp. NO3 BH+ = $\{[-571,74\text{LN}(\text{NO3 [0-40]})+3815,72]/80+[-1082,94*\text{LN}(\text{NO3 [0-40]})+6580,27]/160\}/2$

Resp. NO3 BH- = $\{[-1071,48*\text{LN}(\text{NO3 [0-40]})+4994,44]/80+[-1221,96*\text{LN}(\text{NO3 [0-40]})+5782,87]/160\}/2$

RBH = $\{[-0,025*BH^2+9,78*BH+591,50]/80 + [-0,054*BH^2+19,52*BH+921,03]/160\}/2$

RAD = $\{[11,25*AD-59,20]/80 + [12,70*AD+33,14]/160\}/2$

Nini = $[\text{NO3 (0-20)}/4,425*2*\text{PEA(0-20)}]+[\text{NO3 (20-40)}/4,425*\text{PEA(20-40)}]$

Nmin = $[\text{FM} * 1000 * \text{PEA(0-20)} * \text{MO (0-20)}] + [\text{FM} * 1000 * \text{PEA(20-40)} * (\text{MO (20-40)})/2]$

FM = $-0,00000282*AD^2 + 0,00060246*AD + 0,00500566$

Etapa de validación

A nivel de factor de mineralización

Los resultados obtenidos durante la etapa de validación del modelo de diagnóstico indicaron que los valores observados y simulados del factor de mineralización (FM) ajustaron linealmente con una regresión del 75% (Figura 7).

Además, el índice de coincidencia D entre dichos valores arrojó un resultado de 91,56%, y el cuadrado medio del error RMSE fue de 0,374%, lo cual genera una variación porcentual del 12,98%. Cabe destacar que el FM promedio observado fue de 2,88% y el simulado de 3,04%, con un rango de datos entre los 1,26-3,87 %.

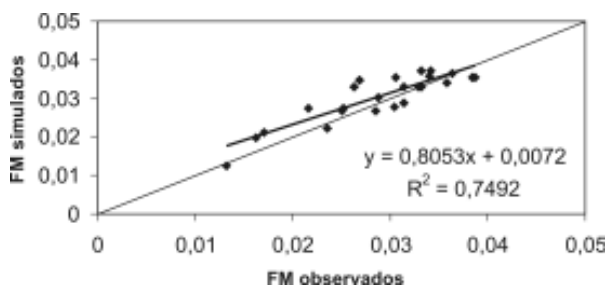


Figura 7: Factor de mineralización (FM) observado y simulado (valor $p < 0,0001$).

A nivel de rendimientos

Los resultados encontrados permitieron establecer que entre los rendimientos observados y simulados hubo un ajuste lineal del 74% (Figura 8). El rendimiento promedio general obtenido, para los valores observados, fue de 8038 kg ha⁻¹ y para los simulados, de 8233 kg ha⁻¹, con un rango de datos que osciló entre los 3000 y 12000 kg ha⁻¹. El índice de coincidencia D fue del 91,75 % y el error promedio (RSME) entre lo observado y simulado fue de 947 kg ha⁻¹, lo que genera una variación porcentual del 11,78 %.

CONCLUSIONES

- La respuesta a la fertilización nitrogenada del maíz en Río Cuarto depende de las condiciones hídricas del cultivo desde un mes previo a la siembra hasta V_6 .

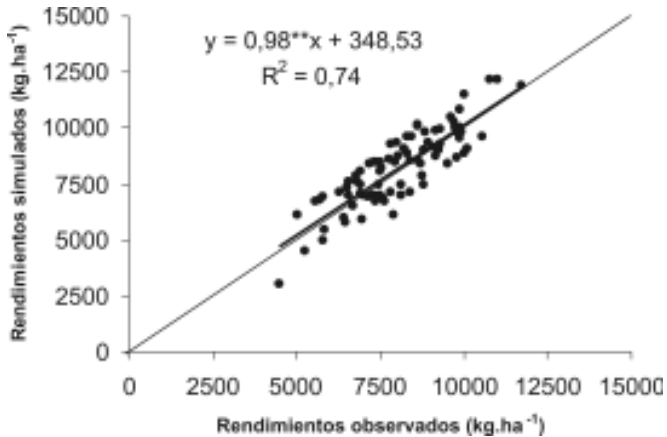


Figura 8: Rendimientos observados y simulados (valor $p < 0.0001$).

- La relación entre la oferta de nitrógeno de nitratos del suelo presentes en V_6 y la respuesta a la fertilización depende de las condiciones hídricas del cultivo desde un mes previo a la siembra hasta V_6 .
- El modelo de diagnóstico realizado ajusta en más del 90% para el Departamento Río Cuarto (Córdoba).

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos agradecer y recordar al Ing. Jorge J. Gesumaría, quien fue partícipe activo en la realización de este trabajo por medio de sus ideas, ya que fueron el eje central de este proceso, de la interpretación de los resultados y del producto obtenido. Además fue un compañero ejemplar de largas horas de trabajo. Lo dedicamos a su memoria (11/09/04).

BIBLIOGRAFÍA

ABDIRASHID, A.; ELMI, C.; MADRAMOOTOO, C. HAMEL. 2000. Influence of water table and nitrogen management on residual soil NO_3^- and denitrification rate under corn production in sandy loam soil in Quebec. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79.:187–197.

- ALVAREZ, R.; ALVAREZ, C.R. 2003. Fertilización Nitrogenada del Maíz en la Pampa Ondulada. EEA INTA Pergamino. Revista Fertilizar Año 8. N.º 31.
- ANDRASKI, T.W.; BUNDY, L.G. 2002. Using the Presidedress Soil Nitrate Test and Organic Nitrogen Crediting to Improve Corn Nitrogen Recommendations. *Agron. J.* 94:1411–1418.
- ANDRESEN, J.A.; ALAGARSWAMY, G.; ROTZ, C.A.; RITCHIE, J.T.; LEBARON, A.W. 2001. Weather Impacts on Maize, Soybean, and Alfalfa Production in the Great Lakes Region, 1895–1996. *Agron. J.* 93:1059–1070.
- BLAKE, G. 1986. Bulk density. In: *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Part 1*, second edition.: 374-390.
- BONO, A.; MONTOYA, J.C.; BABINEC, F.J. 1999. Fertilización en Girasol. Resultados obtenidos en tres años de estudio. Publicación Técnica N° 48. EEA Anguil «Ing. Agr. Guillermo Covas» INTA. 28 p.
- CALVIÑO, P.A.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron. J.* 95:275-281.
- CANTERO, A.; BRICCHI, E.M.; CISNEROS, J.; BECERRA, V.H. GIL G. 1999. Un índice de aptitud relativa de tierras con fines catastrales. Aplicación al Departamento Río Cuarto (Córdoba, Argentina). *Invest. Agr.: Prot. Veg.* Vol 14 (1-2):259-272.
- ESPOSITO, G. 2002. Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranza en cultivo de maíz. Tesis M. Sc Producción Vegetal. FAV-UNRC:113.
- ESPOSITO, G. J. GESUMARIA, C. CASTILLO, R. BALBOA y W. ASNAL. 2002. Respuesta del cultivo de trigo bajo siembra directa a la fertilización nitrogenada y fosfatada. *Centro Agrícola.* N° 1, año 29, enero – marzo 2002.:64-70. Cuba.
- ESPOSITO, G.P.; GESUMARIA, J.J.; CASTILLO, C.A.; ZORZA, E.J.; SAYAGO, F.; DAITA, F. 1997. «Estudio de situación del sistema de siembra directa, en diferentes cultivos en el área de influencia de la U.N.R.C. Actas Resúmenes IV Jornadas Científico-Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC. Río Cuarto. 204-206.
- GARCIA, F. 2000. Avances en Investigación y Experimentación en Fertilización de Cultivos Extensivos en Argentina. INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur. Trabajo presentado en la Tercera Conferencia Fertilizantes Cono Sur organizada por British Sulphur Pub. Punta del Este (Uruguay).
- KATSVAIRO, T.; W.J. COX; H.M. VAN ES. 2003. Spatial Growth and Nitrogen Uptake Variability of Corn at Two Nitrogen Levels. *Agron. J.* 95:1000–1011.
- LIEBIG, J. 1840. *Chemistry in it application to agriculture and physiology*, ed. Taylor and Walron, London.
- MADDONI, G.A., R.A. RUIS, VILLARIÑO, P.; GARCIA, I. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. In. *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* Ed. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.
- MAHMOUDJAFARI, M., G.J. KLUITENBERG, J.L. HAVLIN, J.B. SISSON, A.P. SCHWAB. 1997. Spatial variability of nitrogen mineralization at the field scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1214-1220.
- MELGAR, R. 2002. Manejo del riesgo de la fertilización de Cereales. www.fertilizar.org.ar

- OTEGUI, M.E.; ANDRADE, F.H. 2000. New relationships, between light interception, ear growth, and kernel set in maize. In: Physiology and modelling kernel set in maize. CSSA Special Publication Number 29.
- PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. 1982. Methods of soil analysis. Chemical and Microbiological properties. Part 2, second edition.
- PATTEY, E.; I.B. STRACHAN, J.B. BOISVERT, R.L. DESJARDINS, y N.B. MCLAUGHLIN 2001. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 108:85-99.
- REAG. (Relevamiento de productores agropecuarios). 1999. Gobierno de Córdoba. Ministerio de Producción y Trabajo. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Información Estadística y Técnica. Producción Agrícola. <http://www.cba.gov.ar/vercanal.jsp?idCanal=2067>.
- SADRAS, V.O.; CALVIÑO, P.A. 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agron. J.* 93:577-583.
- SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A.; DOMÍNGUEZ, G. 2000. Evaluation of the Presidedress Soil Nitrogen Test for No-Tillage Maize Fertilized at Planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- SALVAGIOTTI, F.; PEDROL, H.M.; CASTELLARÍN, J.; VERNIZZI, A.; ROSSO, O. 2002. Maíz Zona Núcleo: Efecto de la fertilización balanceada con nitrógeno y azufre sobre el rendimiento y sus componentes y sobre la rentabilidad. EEA INTA Pergamino. *Revista Fertilizar Año 7. N.º 27*.
- SCHARF, P.C.; WIEBOLD, W.J.; LORY, J.A. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agron. J.* 94:435-441.
- SCHMIDT, J.P.; DEJOIA, A.J.; FERGUSON, R.B.; TAYLOR, R.K.; YOUNG, R.K.; HAVLIN, J.L. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen at Multiple In-Field Locations. *Agron. J.* 94:798-806.
- SEILER R.; FABRICIUS R.; ROTONDO V.; VINOCUR M. 1995. *Agroclimatología de Río Cuarto - 1974 / 1993. Volumen I.* Universidad Nacional de Río Cuarto.
- UMARAN, I. Indicadores del sector maicero. 2005. Dirección de Agricultura. Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentos. Ministerio de Economía. República Argentina. www.mecon.gov.ar.
- WALLACH D.; GOFFINET, B.; BERGEZ, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. 2001. Parameter Estimation for Crop Models: A New Approach and Application to a Corn Model. *Agron. J.* 93:757-766.
- WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*. Vol. 63 N.º11:1309-1313.

**Original recibido en julio de 2005
y aprobado en diciembre de 2006.**