

Definition of nitrogen fertilization doses in corn based on the nitrate content of the soil in the V6 stage of the crop in two locations in Chihuahua.

Definición de dosis de fertilización nitrogenada en maíz en base al contenido de nitratos del suelo en la etapa V6 del cultivo en dos localidades de Chihuahua.

Uribe-Montes, Hugo Raul^{1*}; Nava-Ruiz, Paulina¹; Chavez-Sanchez, Noe¹; Ramos-Castro, Wendy Paulina².

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Delicias. Cd. Delicias, Chihuahua, México.

² Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias agrícolas y Forestales. Cd. Delicias, Chihuahua, México

*Autor para correspondencia: hugouribem@hotmail.com

RESUMEN

En los últimos años se ha desarrollado un enfoque que ayuda a definir de manera más racional la cantidad de nitrógeno (N) en forma de fertilizantes que necesitan los cultivos de verano, mucho mejor que los enfoques de balance de masas tradicional y el de dosis óptimas económicas, estamos hablando del enfoque del monitoreo del N dentro de la estación de crecimiento. En este enfoque se destaca el análisis de nitratos del suelo antes de la escarda en maíz, también llamado PSNT (Presidedress Soil Nitrate Test, por sus siglas en inglés) y el medidor de clorofila de la hoja (Greenseaker o Leaf Chlorophyll Meter, LCM). En la Subestación Lázaro Cárdenas del INIFAP, los resultados mostraron que el análisis de $\text{NO}_3\text{-N}$ a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V₆ (PSNT) refleja adecuadamente la disponibilidad de N del suelo para el maíz, incluso cuando algo de N se haya aplicado a la siembra y puede ser usado como un método para definir la dosis que requiere el cultivo en el momento adecuado de aplicación, sin arriesgar a que el rendimiento disminuya y minimizando el riesgo de contaminación de los acuíferos. Para la variable forraje para silo (t/ha) se determinó un modelo donde como ordenada al origen (0 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$) fue de 24.7 t/ha y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 23.5 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$ con lo cual se producen 42.8 t/ha de forraje, por lo que se concluye que no existe respuesta a concentraciones mayores de nitratos y es la agrónomicamente apropiada. En esta localidad, la aplicación de nitrógeno en la etapa V₆ en maíz fue más eficiente que la aplicación a la siembra y la mayor eficiencia de uso fertilizante la tuvieron los tratamientos 9, 10, 11 y 12 los cuales fueron aplicados en la etapa V₆ del maíz, con 57, 59, 55 y 54%.

A diferencia de la localidad Subestación Lázaro Cárdenas en la localidad CEDEL no hubo respuesta del rendimiento de forraje para ensilar, peso seco de forraje o rendimiento de grano a la aplicación de nitrógeno al maíz.

Palabras clave: Nitratos, maíz, PSNT.

ABSTRACT

In recent years, an approach has been developed that helps to more rationally define the amount of nitrogen (N) in the form of fertilizers that summer crops need, much better than the traditional mass balance and optimal economic dose approaches, we are talking about the approach to N monitoring within the growing season. This approach highlights the analysis of soil nitrates before weeding in corn, also called PSNT (Presidedress Soil Nitrate Test, for its acronym in English) and the leaf chlorophyll meter (Greenseaker or Leaf Chlorophyll Meter, LCM). At the Lázaro Cárdenas Substation of INIFAP, the results showed that the analysis of $\text{NO}_3\text{-N}$ at 30 cm soil depth in stage V₆ (PSNT) adequately reflects soil N availability for corn, even when some N has been applied to sowing and can be used as a method to define the dose required by the crop at the appropriate time of application, without risking a decrease in yield and minimizing the risk of contamination



of aquifers. For the silo forage variable (t/ha), a model was determined where as the ordinate to the origin (0 ppm of $\text{NO}_3\text{--N}$) it was 24.7 t/ha and as the intersection point or response threshold it was 23.5 ppm of $\text{NO}_3\text{--N}$, with which 42.8 t/ha of forage are produced, so it is concluded that there is no response to higher concentrations of nitrates and it is agronomically appropriate. In this location, the application of nitrogen in the V6 stage in corn was more efficient than the application to planting and the highest efficiency of fertilizer use was found in treatments 9, 10, 11 and 12, which were applied in the V6 stage of the corn, with 57, 59, 55 and 54%.

Unlike the Lázaro Cárdenas Substation locality, in the CEDEL locality there was no response in the yield of forage for silage, dry weight of forage or grain yield to the application of nitrogen to corn.

Keywords: Nitrates, corn, PSNT.

INTRODUCCIÓN

La agricultura aporta alrededor del 58% del total de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso (N_2O), con una amplia gama de incertidumbre en las estimaciones tanto de la contribución de la agricultura y el total antropogénico (Smith *et al.*, 2007). El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero potente (GEI), que se libera después de la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Bouwman y Boumans, 2002). Se puede encontrar en el Panel Intergubernamental sobre el Informe de Cambio Climático (Smith *et al.*, 2007) que al mejorar la Eficiencia de Uso del N (NUE) puede reducir las emisiones de N_2O e indirectamente reducir emisiones de GEI del N fabricado como fertilizante (Schlesinger, 1999).

Las prácticas que mejoran la eficiencia de uso del N incluyen el ajuste de las dosis de aplicación, basado en la estimación precisa de las necesidades de los cultivos (por ejemplo, el análisis de nitratos del suelo en la escarda también llamado PSNT o la agricultura de precisión); uso de formas de fertilizantes de liberación controlada o lenta o inhibidores de la nitrificación (que frenan los procesos microbianos que conducen a la formación de N_2O); aplicación del N en el momento que sea menos susceptible a la pérdida, a menudo justo antes de la mayor absorción por la planta (mejor época); colocando el N con más precisión en el suelo para hacerlo más accesible a las raíces de los cultivos (en banda); o evitar las aplicaciones de N en exceso a los requerimientos de las plantas (Robertson, 2004; Dalal *et al.*, 2003; Paustian *et al.*, 2004; Cole *et al.*, 1997; Monteny *et al.*, 2006). La necesidad de desarrollar mejores métodos para estimar la dosis de aplicación de fertilizante nitrogenado se ha hecho urgente en los últimos

tiempos, sobre todo por el incremento de los fertilizantes y la preocupación generalizada de la contaminación por NO_3 en las aguas superficiales y subterráneas.

Estudios recientes utilizando el PSNT han demostrado una buena correlación entre el rendimiento del grano de maíz y el contenido de $\text{NO}_3\text{--N}$ de la superficie del suelo cuando las plantas están en V_4 a V_6 (Magdoff *et al.*, 1984; Fox *et al.*, 1989; Binford *et al.*, 1992; Meisinger *et al.*, 1992b). El contenido de $\text{NO}_3\text{--N}$ del suelo en esa etapa representa el balance neto entre la producción (mineralización del N de la materia orgánica del suelo, estiércol y/o fertilizantes) y la pérdida (lixiviación, desnitrificación, y la inmovilización del N) debido a que poco o nada de N se absorbe antes de esa etapa (Meisinger *et al.*, 1992b). Magdoff *et al.* (1984) han propuesto al PSNT como un índice de la intensidad de mineralización de N de la materia orgánica del suelo, partiendo del supuesto de que la mayor parte de N del cultivo debe aplicarse en la etapa V_4 a V_6 . Sin embargo, el PSNT también puede ser usado como una herramienta para evaluar aplicaciones de N hechas antes de la siembra e indicar si se necesita N adicional en V_6 (Binford *et al.*, 1992). El análisis de $\text{NO}_3\text{--N}$ a 30 cm del suelo en maíz (*Zea mays* L.) cuando las plantas miden entre 15 y 30 cm o están en la etapa V_6 (Ritchie y Hanway, 1982), permite a los productores de maíz ajustar sus prácticas de fertilización de N para las interacciones específicas de cada localidad con el clima, tipo de suelo y las prácticas de manejo. Dichos ajustes podrían incrementar la redituabilidad de la producción de maíz y disminuir los problemas ambientales asociados con el uso de fertilizantes nitrogenados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un suelo Yermosol cálcico (FAO/UNESCO, 1974) en dos localidades de la región agrícola de Delicias, Chihuahua, ubicados en la localidad Lázaro Cárdenas (28°24'13"N; 105°30'47"W) y Campo Experimental Delicias (28°11'12"N; 105°29'50"W) pertenecientes al Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Las características del suelo en su estrato 0-30 cm de profundidad para la textura, pH, M.O. (%), C.E. (ds/m), NO₃ (ppm), P (ppm), K (ppm), Fe (ppm), Zn (ppm), Cu (ppm) y Mn (ppm) fue franco arcilloso-arenoso, 8.67, 0.89, 0.79, 15.5, 4.5, 230, 3.4, 3.1, 0.4, y franco arenoso, 8.27, 0.81, 0.61, 18.7, 4.0, 274, 5.4, 3.0, 0.5, 12.2 en la localidad Lázaro Cárdenas y Campo Experimental Delicias, respectivamente.

Se sembró en el Campo Experimental Delicias el 13 de junio el híbrido Gorila de Asgrow con una población de 70,000 plantas/ha, se le aplicó un riego de presiembra y 5 de auxilio, cabe mencionar que el año fue lluvioso en donde se acumularon alrededor de 200 mm en los meses de julio y agosto. El cultivo se aplicó cuatro veces cuando la planta era joven (etapa V₂-V₄) con una solución foliar de 4% y 0.25% de SO₄ Fe y SO₄ Zn, respectivamente, para evitar clorosis férrica. Se aplicaron dos veces Coragen (Rynaxipir) a razón de 80 ml/ha y 10 kg/ha de Clorpirifos 5% para controlar Gusano cogollero. En la localidad Lázaro Cárdenas se sembró el 11 de julio el híbrido Asgrow 7573 con una población de 70,000 plantas/ha, se le aplicó un riego de presiembra y 6 de auxilio, cabe mencionar que el año fue lluvioso en donde se acumularon alrededor de 200 mm en los meses de julio y agosto. El cultivo se aplicó dos veces cuando la planta era joven (etapa V₂-V₄) con una solución foliar de 4% y 0.25% de SO₄ Fe y SO₄ Zn, respectivamente, para evitar clorosis férrica. Se aplicó dos veces Lorspac 5% (Clorpirifos) para controlar Gusano cogollero.

Las parcelas experimentales en ambas localidades constaron de seis surcos de 0.8 m de ancho y 10 m de largo. Del surco dos y tres se tomó una muestra de tres m lineales de plantas (4.8 m²) para estimar rendimiento de forraje para silo de maíz cuando la planta tenía alrededor de 35 % de materia seca y los surcos 4 y 5 (8 m²) sirvieron para estimar rendimiento de grano con un 16% de humedad. El diseño de tratamientos (tratamientos del 1 al 6 en el cuadro 1) fue pensado para obtener datos de concentración de

NO₃ del suelo tomados en la etapa V₆ del maíz que al correlacionarlos con el rendimiento de forraje o grano, nos permitan determinar el umbral de concentración de NO₃ del suelo en ppm para posteriormente definir cuánto fertilizante es necesario aplicar en V₆ para obtener el máximo rendimiento; además se evaluaron épocas de aplicación de N para maximizar rendimientos con un mínimo impacto ambiental (tratamientos 7 a 10). Se utilizó urea como fuente de N, aplicada en banda a 5 cm al lado de la hilera de maíz.

Cuadro 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz utilizados para el análisis de nitratos en el suelo. 2017. INIFAP-Delicias.

Tratamiento	Época de aplicación de N (kg/ha)		N total (kg/ha)
	Siembra	V6	
1	0	0	0
2	45	0	45
3	90	0	90
4	135	0	135
5	180	0	180
6	225	0	225
7	0	45	45
8	0	90	90
9	0	135	135
10	0	180	180
11	45	135	180
12	90	90	180
13	Estiércol (60 t/ha)	0	243 ^y
14	Biosólidos (10 t/ha)	0	200 ^z
15	Testigo	0	0

^y Nitrógeno estimado en el estiércol, calculado a partir de 13.5 kg Mg⁻¹ (Laboratorio de Wisconsin, J.B. Peters) con un índice de mineralización de 0.25 en el 1er. Año (Eghball et al., 2002).

^z Nitrógeno estimado en los biosólidos, calculado a partir de 40 kg de N Mg⁻¹ (Uribe et al., 2004) con un índice de mineralización de 0.50 en el 1er. Año (Uribe et al., 2004).

Se evaluaron dos tratamientos con materiales orgánicos (estiércol y biosólidos) producidos en la región, comúnmente utilizados en la agricultura, aplicados en cantidades que se supone satisfacen los requerimientos de N del cultivo. Los tratamientos del 1 al 12 fueron aplicados con 80 kg/ha de P₂O₅.

Para N-NO₃ se muestreó 30 Días Después de la Siembra (DDS), justo antes de que iniciara el crecimiento rápido de la planta y se diera la máxima absorción del nitrógeno. Esta época es la más importante para decidir si el N del suelo es suficiente o cuanto es necesario aplicar para cubrir las necesidades del cultivo. En esta época se tomó un set de tres muestras de cada parcela experimental (una muestra a cada lado de la hilera de maíz del



surco 2 y otra en el centro del surco entre el surco 2 y 3), con lo que se generaron 75 muestras de suelo en cada localidad, en cinco repeticiones de cada tratamiento y poder correlacionarlos con el rendimiento. Las muestras se secaron al aire, se tamizaron y se mandaron al laboratorio para su análisis. El diseño experimental fue bloques al azar con cinco repeticiones. Se analizaron nitratos en el suelo mediante el método de la brucina, antes de que iniciara el crecimiento rápido en maíz. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis de varianza correspondiente, se determinó la comparación múltiple de medias con la prueba DMS ($\alpha=0.05$) y se utilizó el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1988) Se midieron rendimiento de forraje y grano en maíz. Estos rendimientos se correlacionaron con la concentración de NO_3 en el suelo para determinar el umbral de NO_3 mediante los modelos de superficie de respuesta del tipo lineal segmentado con el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS (Ihnen y Goodnight, 1985).

Cuadro 2. Tratamientos de N aplicados en la siembra y etapa V₆ del maíz y concentración de NO_3 (ppm) en la etapa V₆ de cinco repeticiones en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

N Fertilización (kg/ha)		No. Tratamiento	Repetición					Promedio
Siembra	V ₆		I	II	III	IV	V	
0	0	1	11.2	13.0	10.1	8.6	14.7	11.5
45	0	2	14.4	16.6	14.2	13.2	16.0	14.9
90	0	3	17.4	17.4	19.1	15.8	16.9	17.3
135	0	4	31.0	22.3	18.5	24.2	23.5	23.9
180	0	5	36.1	27.5	44.7	30.1	25.6	32.8
225	0	6	47.5	29.3	53.4	61.1	36.3	45.5
0	45	7	9.8	8.7	11.9	10.7	9.2	10.1
0	90	8	14.4	14.2	11.1	10.4	6.6	11.3
0	135	9	7.7	16.4	12.5	9.3	11.0	11.4
0	180	10	10.0	14.3	12.5	10.6	9.7	11.4
45	135	11	17.4	12.1	13.8	21.4	12.5	15.4
90	90	12	34.2	36.6	17.7	17.5	17.3	24.7
Estiércol vacuno		13	29.5	34.2	30.0	31.1	27.9	30.5
Biosólidos		14	22.0	18.2	18.2	25.8	29.9	22.8
Testigo		15	11.1	15.4	13.7	15.2	14.3	13.9

El maíz para forraje y para grano respondió positivamente a la aplicación de N como se muestra en el cuadro 3 y 4, donde se observan incrementos de 10 t/ha de forraje comparando el tratamiento sin N vs la aplicación de 225 kg/ha de N. Sin embargo, se

Localidad Lázaro Cárdenas. El cuadro 2 muestra las diferentes dosis de N aplicados antes de la siembra de maíz (tratamientos 1-6), los cuales se utilizaron para simular diferentes concentraciones de nitratos (ppm) en el suelo en la etapa V₆ del maíz, donde se puede ver un gradiente de concentración de 10 ppm cuando no se aplicó N hasta cerca de 24 ppm donde se aplicó 135 kg/ha de N ó 45 ppm donde se aplicaron 225 kg/ha de N. El suelo utilizado en el experimento poseía una cantidad significativa de nitratos residual de alrededor de 10 ppm como lo muestran los tratamientos 1, 7, 8, 9 y 10 del mismo cuadro con concentraciones de 10.1 hasta 11.5. La aplicación de 45 kg/ha de N produjo incrementos de 3 ppm en los primeros dos niveles, pero se incrementó hasta 6 ppm al pasar de 90 a 135 kg/ha.

observa que los tratamientos 135, 180 y 225 kg/ha son estadísticamente iguales, permitiendo esto la

posibilidad de utilizar la dosis más baja de N para impactar menos el medio ambiente, sin la disminución significativa del rendimiento.

Cuadro 3. Rendimiento de forraje para ensilar, peso fresco de elote y peso seco de grano en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

No. Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Forraje para silo (t/ha)	Peso fresco de elote (t/ha)		Peso seco de grano (t/ha)	
	Siembra	Etapas V ₆					
1	0	0	33.5 de	11.3	g	6.1	f
2	45	0	36.5 cd	13.1	fg	7.6	e
3	90	0	36.6 cd	12.7	fg	8.6	de
4	135	0	42.2 ab	16.9 abc		9.6	bcd
5	180	0	42.8 ab	18.2 a		9.5	bcd
6	225	0	43.6 a	17.8 ab		10.1	abc
7	0	45	37.3 cd	13.9	ef	8.5	de
8	0	90	38.8 bc	15.6	cde	9.8	abcd
9	0	135	42.8 ab	17.4 abc		10.4	ab
10	0	180	41.8 ab	17.1 abc		10.4	ab
11	45	135	42.6 ab	17.1 abc		11.1	a
12	90	90	42.3 ab	17.8 ab		10.2	ab
13	Estiercol		40.3 abc	16.1	bcd	9.5	bcd
14	Biosolidos		38.7 bc	14.5	def	8.7	cde
15	Testigo		30.9 e	11.2	g	5.3	f

Letras distintas indican diferencia estadística significativa (DMS, α=0.05).

Cuadro 4. Rendimiento de forraje seco, peso seco de elote y peso seco de grano de elote en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

No. Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Forraje seco (t/ha)	Peso seco de elote (t/ha)		Peso seco de grano de Elote (t/ha)	
	Siembra	Etapas V ₆					
1	0	0	16.3 de	7.6	g	6.4	f
2	45	0	16.3 cde	8.6	efg	7.2	ef
3	90	0	16.2 cde	8.1	fg	6.7	de
4	135	0	18.9 ab	11.0 abc		9.3	abc
5	180	0	19.9 a	11.3 ab		9.4	ab
6	225	0	19.1 ab	11.3 ab		9.3	abc
7	0	45	16.8 bcd	9.3	def	7.9	de
8	0	90	16.7 bcd	10.0	bcd	8.5	bcd
9	0	135	18.7 abc	11.6 a		9.7	a
10	0	180	18.4 abc	11.5 a		9.5	ab
11	45	135	19.8 a	11.2 ab		9.5	ab
12	90	90	18.3 abc	11.5 a		9.7	a
13	Estiercol		18.7 abc	10.5	abcd	8.8	abcd
14	Biosolidos		17.4 abcd	9.7	cde	8.2	cde
15	Testigo		13.8 e	7.5	g	6.3	f

Letras distintas indican diferencia estadística significativa (DMS, α=0.05).

La fertilización con nitrógeno en V₆ en maíz (Ritchie y Hanway, 1982) es más eficiente que la aplicación a la siembra, sobretodo en labranza de conservación (Wells y Bitzer, 1984; Fox *et al.*, 1986; Wells *et al.*, 1992; Sainz Rozas *et al.*, 1999). Sin embargo algunos técnicos y agricultores en las regiones agrícolas maiceras sugieren se aplique Urea [(NH₂)₂CO] ó UAN32 en banda al momento de la siembra y las dosis de N se determinan comúnmente utilizando el enfoque de balance de masas de N

“encima del suelo” (Meisinger, 1984) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$N_f = (N_{ch} + N_{cr} - e_s N_{sin} - e_m N_{min}) / e_f$$

Donde: N_f = es la entrada de N fertilizante; N_{ch} = N del grano de cultivos; N_{cr} = N del residuo de la cosecha; N_{min} = mineralización del N del suelo estimado; N_{sin} = N inorgánico del suelo estimado; e_f = fracción del N_f en la biomasa aérea; e_s= fracción del N_{sin} en el biomasa aérea, y e_m= fracción del N_{min} en la biomasa aérea.

En la ecuación anterior, N_{sin} es determinado al momento de la siembra, y N_{min} se calcula (estima) a



partir del contenido de N orgánico multiplicado por un coeficiente de mineralización (1-3%). Esta metodología puede estar sujeta a considerables errores, debido a que una fracción del N mineralizado del suelo determinado al momento de la siembra puede perderse antes de ser absorbido por las plantas (Hergert, 1987). Además, la magnitud de mineralización de N depende del contenido de la materia orgánica, calidad y accesibilidad del sustrato, humedad y temperatura del suelo (Rice y Havlin, 1994).

Estudios recientes utilizando el análisis de NO_3 en el suelo en V_6 (PSNT) han demostrado una buena correlación entre el rendimiento del grano de maíz y el contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ de la superficie del suelo cuando las plantas están en V_4 a V_6 (Magdoff *et al.*, 1984; Fox *et al.*, 1989; Binford *et al.*, 1992; Meisinger *et al.*, 1992b; Sims *et al.*, 1995; Sainz-Rosas *et al.*, 2000). El contenido de $\text{NO}_3\text{-N}$ del suelo en esa etapa representa el balance neto entre la producción (mineralización del N de la materia orgánica del suelo, estiércol y/o fertilizantes) y la pérdida (lixiviación, desnitrificación, y la inmovilización del N) debido a que poco o nada de N se absorbe antes de esa etapa (Meisinger *et al.*, 1992b). Magdoff *et al.* (1984) han propuesto al PSNT como un índice de la intensidad de mineralización de N de la materia orgánica del suelo, partiendo del supuesto de que la mayoría N debe aplicarse en la etapa V_4 a V_6 . Sin

embargo, el PSNT también puede ser usado como una herramienta para evaluar aplicaciones de N hechas antes de la siembra e indicar si se necesita N complementario en V_6 (Binford *et al.*, 1992).

En la localidad Lázaro Cárdenas en el 2017, se pudo observar una respuesta favorable a la aplicación de nitrógeno en V_6 acorde a lo mencionado por los investigadores citados en la literatura, observándose que el tratamiento 10 (0 kg/ha de N en la siembra) con 10 ppm en el suelo cuando se le aplicó 180 kg/ha de N en V_6 incrementó 8.3 t/ha de forraje verde, mientras que el tratamiento 11 (45-135) con 15 ppm en el suelo incrementó 6.1 t/ha cuando se le aplicó 135 kg/ha de N en la etapa V_6 . Para corroborar esto, a las variables estudiadas se le practicaron contrastes ortogonales comparándose los tratamientos 2, 3, 4 y 5 (fertilización a la siembra) vs 7, 8, 9 y 10 (fertilización en V_6), observándose alta significancia estadística en Peso seco de elote, Peso seco de grano de elote y Peso seco de grano, teniendo una mejor respuesta del cultivo cuando se fertiliza en V_6 . Estas diferencias se observan más claramente en la figura 1, teniéndose 1 t/ha mas de producción de grano cuando se fertiliza con N en la etapa V_6 del maíz (época de escarda o primer riego de auxilio), este incremento es mayor en dosis bajas (45 y 90 kg/ha) en comparación a las altas (135 y 180 kg/ha).

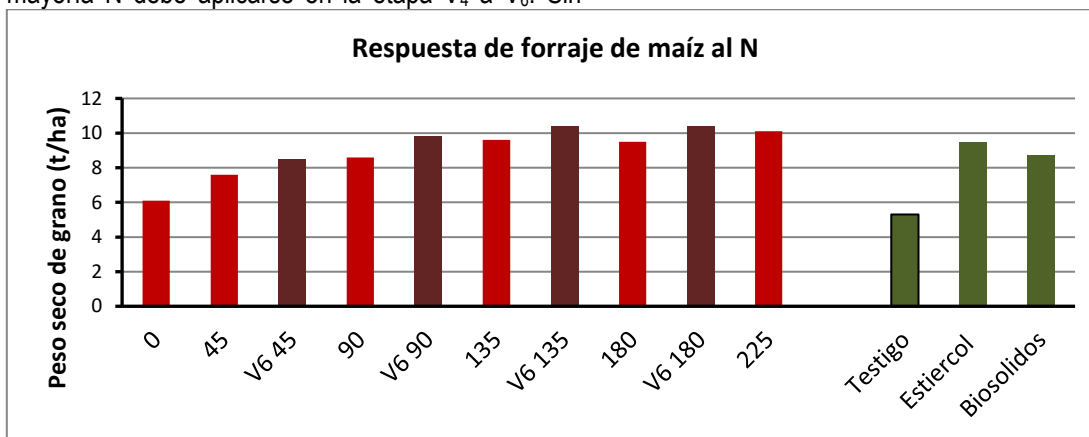


Figura 1. Rendimiento de Peso seco de grano (t/ha) de las diferentes dosis y épocas de aplicación de N en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

Un objetivo específico fue determinar el umbral de concentración de nitratos del suelo (ppm de NO_3) en que hay respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz. Para lograrlo, se analizó el comportamiento de diferentes variables de producción (FV= Forraje verde o Forraje para silo; FS= Forraje seco; PFE=

Peso fresco de elote; PSE= Peso seco de elote; PSGE= Peso seco de grano de elote; PSG= Peso seco de grano) en función de la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la etapa V_6 del maíz, simulados por la aplicación de dosis crecientes de N (0, 45, 90, 135, 180 y 225 kg/ha), en 30 parcelas generadas de seis

tratamientos por cinco repeticiones. En todas las variables estudiadas se notaban dos áreas definidas; en la primera existe una fuerte respuesta del rendimiento hasta alrededor de 20 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$; y en la segunda área los rendimientos desde 20 hasta 45 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$ fueron similares, por lo que fue necesario definir estadísticamente el punto que delimita las dos áreas. Para ello, se obtuvieron modelos de superficie de respuesta del tipo lineal segmentado mediante el procedimiento NLIN (Ihnen y Goodnight, 1985), para cada una de las variables estudiadas como se muestra en el cuadro 5, donde el

umbral de respuesta varió desde 20.3 hasta 25.2 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$.

Por ejemplo, para la variable forraje para ensilar (t/ha) se determinó un modelo donde como ordenada al origen (0 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$) fue de 24.7, y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 23.5 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$ con lo cual se producen 42.8 t/ha de forraje (figura 2). De esto se concluye que no existe respuesta a concentraciones mayores, por lo que agrónomicamente esta es la apropiada.

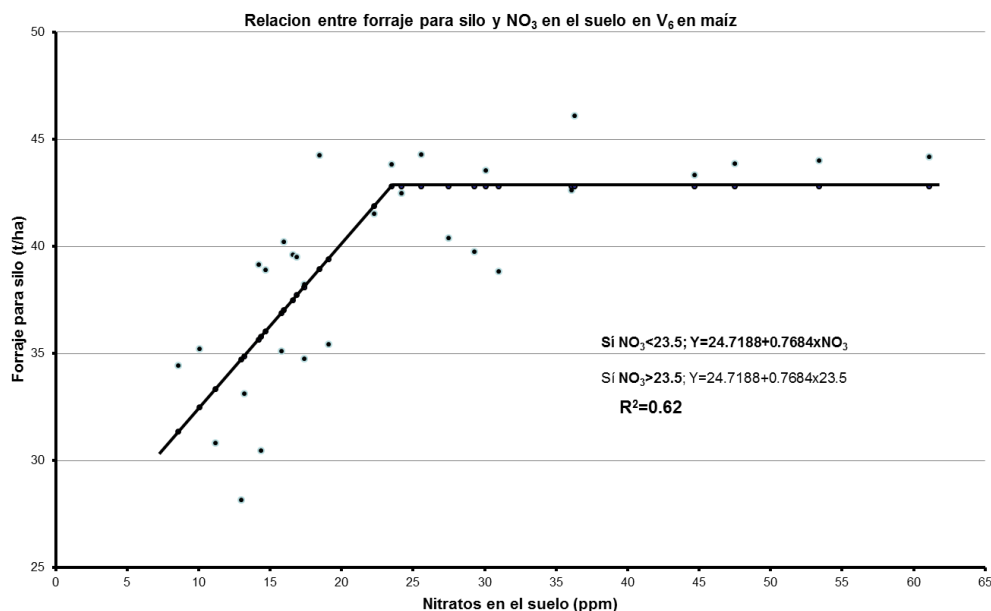


Figura 2. Rendimiento de forraje para silo (t/ha) en respuesta a la concentración de NO_3 (ppm) en el suelo en la etapa V_6 del maíz en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

Se observaron relaciones estrechas ($R^2 = 0.50\text{--}0.68$, $P = 0.0001$) entre las variables de rendimiento estudiadas y la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo a 0-30 cm en la etapa V_6 del maíz, en la localidad Lázaro Cárdenas del INIFAP (cuadro 5). Estos resultados están de acuerdo con la investigación reportada anteriormente (Magdoff *et al.*, 1984; Fox *et al.*, 1989; Meisinger *et al.*, 1992b; Binford *et al.*, 1992; Bundy y Andraski, 1995; y Sims *et al.*, 1995; Sainz-Rosas *et al.*, 2000) e indican que bajo las condiciones de suelo y ambiente en esta localidad antes de la etapa V_6 del maíz, el análisis de $\text{NO}_3\text{-N}$ de 0-30 cm de profundidad (PSNT) puede ser usado como un índice de la intensidad de la mineralización

del N de la materia orgánica del suelo antes de V_6 y del N nitrificado de la urea $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ aplicada a la siembra, ambos denotan el potencial de suministro

de N para el cultivo. El pequeño número de puntos que caen en el cuadrante superior izquierdo confirman esta idea (Figura 2). Por otro lado, los pocos puntos que caen en el cuadrante inferior derecho indican la lixiviación fuera de la zona de la raíz, pérdidas por desnitrificación e inmovilización de $\text{NO}_3\text{-N}$ después de V_6 no fueron importantes bajo las condiciones de este experimento.

Cuadro 6. Tratamientos de N y bipartición del N absorbido por la planta hacia el follaje y grano de maíz en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

No. Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Nitrogeno en follaje (kg/ha)	Nitrogeno en grano (kg/ha)	Nitrogeno en el total de planta (kg/ha)	Eficiencia de uso de fertilizante (%)
	Siembra	Etapas V ₆				
1	0	0	67	72	139	-----
2	45	0	72	81	153	31
3	90	0	70	89	159	22
4	135	0	80	123	203	44
5	180	0	80	121	201	34
6	225	0	77	136	213	33
7	0	45	48	85	133	-----
8	0	90	68	104	172	37
9	0	135	83	133	216	57
10	0	180	101	144	245	59
11	45	135	86	152	238	55
12	90	90	80	156	236	54
13	Estiercol		77	129	206	
14	Biosólidos		68	116	184	
15	Testigo		55	93	148	

La mayor eficiencia de uso fertilizante la tuvieron los aplicados en la etapa V₆ del maíz, con 57, 59, 55 y 54% de eficiencia (cuadro 6).

Cuadro 6. Tratamientos de N y bipartición del N absorbido por la planta hacia el follaje y grano de maíz en la localidad Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

No. Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Nitrogeno en follaje (kg/ha)	Nitrogeno en grano (kg/ha)	Nitrogeno en el total de planta (kg/ha)	Eficiencia de uso de fertilizante (%)
	Siembra	Etapas V ₆				
1	0	0	67	72	139	-----
2	45	0	72	81	153	31
3	90	0	70	89	159	22
4	135	0	80	123	203	44
5	180	0	80	121	201	34
6	225	0	77	136	213	33
7	0	45	48	85	133	-----
8	0	90	68	104	172	37
9	0	135	83	133	216	57
10	0	180	101	144	245	59
11	45	135	86	152	238	55
12	90	90	80	156	236	54
13	Estiercol		77	129	206	
14	Biosólidos		68	116	184	
15	Testigo		55	93	148	

Un enfoque general para estimar las necesidades de fertilizante nitrogenado basado en el análisis de nitratos del suelo es utilizando la siguiente ecuación:

$$Nf = [(RM - RP)N_n] / E$$

Donde:

Nf = Recomendación de fertilizante nitrogenado (kg N ha⁻¹).
 RM = Rendimiento meta (Mg ha⁻¹).
 RP = Rendimiento posible estimado sin ningún fertilizante añadido (Mg ha⁻¹).
 N_n = Necesidades estimadas de N para altos rendimientos (kg N ha⁻¹).
 E = Eficiencia de absorción de N.

Asumiendo que: 1) las necesidades de maíz para silo de alto rendimiento es 11.5 kg de N/t (Standford, 1973); 2) 20% de N más es absorbido por raíces y rastrojos (tocones), además del ensilado cosechado; y 3) la eficiencia de la absorción de N es de 70% por lo tanto la ecuación se convierte en $Nf = (RM - RP)20.5$.

Cálculo de rendimiento de forraje seco ajustado y necesidades fertilizantes en base a los resultados generados en el experimento se muestran en el cuadro 7.



Cuadro 7. Cálculo de rendimiento de forraje seco ajustado y necesidades fertilizantes en base a los resultados generados en el experimento en la localidad CEDEL. 2017. INIFAP-Delicias.

Forraje en mat. seca (t/ha) $Y=10.9337+0.3562(NO_3)$	Forraje fresco (t/ha) $Y=24.7188+0.7664(NO_3)$	Fertilizante nitrogenado (kg/ha) $Nf= (RM-RP)20.5$
$Y=10.9337+0.3562(0)=10.9$	$Y=24.7188+0.7664(0)=24.7$	$Nf= (19.3-10.9)20.5=172$
$Y=10.9337+0.3562(3)=12.0$	$Y=24.7188+0.7664(3)=27.0$	$Nf= (19.3-12.0)20.5=150$
$Y=10.9337+0.3562(6)=13.1$	$Y=24.7188+0.7664(6)=29.3$	$Nf= (19.3-13.1)20.5=127$
$Y=10.9337+0.3562(9)=14.1$	$Y=24.7188+0.7664(9)=31.6$	$Nf= (19.3-14.1)20.5=107$
$Y=10.9337+0.3562(12)=15.2$	$Y=24.7188+0.7664(12)=33.9$	$Nf= (19.3-15.2)20.5=84$
$Y=10.9337+0.3562(15)=16.3$	$Y=24.7188+0.7664(15)=36.2$	$Nf= (19.3-16.3)20.5=62$
$Y=10.9337+0.3562(18)=17.3$	$Y=24.7188+0.7664(18)=38.5$	$Nf= (19.3-17.3)20.5=41$
$Y=10.9337+0.3562(21)=18.4$	$Y=24.7188+0.7664(21)=40.8$	$Nf= (19.3-18.4)20.5=19$
$Y=10.9337+0.3562(23.5)=19.3$	$Y=24.7188+0.7664(23.5)=42.7$	$Nf= (19.3-19.3)20.5=0$

Para cada región agrícola es conveniente tener un cuadro de recomendaciones como el mostrado en el cuadro 8 donde dependiendo del potencial de rendimiento del suelo, podamos sugerir cuanto fertilizante aplicar.

Cuadro 8. Generación de recomendaciones de fertilización nitrogenada en maíz para forraje en materia seca, en base al contenido de $N-NO_3$ en el suelo en la etapa V_6 y el potencial del cultivo en el sitio experimental Lázaro Cárdenas. 2017. INIFAP-Delicias.

NO_3 suelo	10.9	12.0	13.1	14.1	15.2	16.3	17.3	18.4	19.3
ppm				Fertilizante adicional (kg/ha de N)					
0	0	19	41	62	84	107	127	150	172
3		0	19	41	62	84	107	127	150
6			0	19	41	62	84	107	127
9				0	19	41	62	84	107
12					0	19	41	62	84
15						0	19	41	62
18							0	19	41
21								0	19
23.5									0

Localidad Campo Experimental Delicias (CEDEL).

A diferencia de la localidad Lázaro Cárdenas, en la localidad CEDEL no hubo consistencia en la respuesta del rendimiento de forraje para ensilar, peso seco de forraje o rendimiento de grano a la aplicación de nitrógeno al maíz (cuadro 9), donde, por ejemplo, el rendimiento de grano es igual estadísticamente en todos los tratamientos excepto en el tratamiento 1 (0 N en siembra y V_6) y 7 (0 N en siembra y 45 kg/ha en V_6) los cuales fueron diferentes con menor rendimiento. Esto fue probablemente debido a un buen contenido de nitratos en el suelo y a que el año agrícola fue lluvioso y cálido propicio para el buen desarrollo del cultivo [cuando las plantas tenían 5 hojas verdaderas se dio el primer riego de auxilio y las plantas de los tratamientos 1 (0 N en siembra y V_6) y 6 (225 kg/ha de N en siembra y 0 en V_6) lucían iguales], las lluvias

iniciaron el 12 de julio cuando el cultivo estaba en V_6 y se acumularon 140 mm de lluvia en ese mes, estas condiciones promovieron la mineralización del N de la materia orgánica del suelo, el estiércol y

Biosólidos. Estas mismas condiciones ambientales fomentaron el desarrollo extraordinario del cultivo como lo muestran los rendimientos del cuadro 9, notándose que el rendimiento de grano, peso de forraje seco y forraje para silo del tratamiento 15 (testigo absoluto) fue 6.2, 7.9 y 18.0 t/ha más grande en la localidad CEDEL que en la localidad Lázaro Cárdenas. Algo parecido ocurrió con el tratamiento 1 (0 N en siembra y V_6), 13 (60 t/ha de Estiércol) y 14 (10 t/ha de Biosólidos) los cuales contienen materia orgánica mineralizable, por lo que se deduce que la buena producción de nitratos de la materia orgánica después de la etapa V_6 uniformizó el rendimiento de todos los tratamientos.

Cuadro 9. Tratamientos de N y rendimiento de forraje para silo, peso seco de forraje y peso seco de grano en la localidad CEDEL. 2017. INIFAP-Delicias.

No. Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Forraje para silo (t/ha)	Peso seco de forraje (t/ha)	Peso seco de grano (t/ha)
	Siembra	Etapas V6			
1	0	0	47.0 e	22.7 cd	9.7 c
2	45	0	47.7 e	22.0 cd	10.9 ab
3	90	0	47.6 e	22.2 cd	11.1 ab
4	135	0	50.2 bcde	22.6 cd	11.2 ab
5	180	0	52.9 bc	24.1 abc	11.2 ab
6	225	0	53.0 bc	23.8 abcd	11.3 ab
7	0	45	48.1 de	22.0 cd	10.7 bc
8	0	90	51.7 bcd	25.8 a	11.3 ab
9	0	135	47.5 e	22.0 cd	11.0 ab
10	0	180	50.5 bcde	23.8 abcd	11.2 ab
11	45	135	49.2 cde	23.0 bcd	11.2 ab
12	90	90	53.9 ab	25.1 ab	11.2 ab
13	Estiercol		57.4 a	25.2 ab	11.5 ab
14	Biosólidos		51.7 bcd	23.5 abcd	11.7 a
15	Testigo		48.8 de	21.7 d	11.5 ab

Letras distintas indican diferencia estadística significativa (DMS, $\alpha=0.05$).

Por lo tanto, escenarios donde no existe respuesta no son útiles para lograr los objetivos planteados en el proyecto, por lo que se sugiere previo al establecimiento del experimento sembrar un cultivo que extraiga un porcentaje considerable de N del suelo, el cual puede ser mijo perla, ballico anual, triticale o avena forrajera.

CONCLUSIONES

En la localidad Lázaro Cárdenas del INIFAP, los resultados mostraron que el análisis de $\text{NO}_3\text{--N}$ a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V6 (PSNT) refleja adecuadamente la disponibilidad de N del suelo para el maíz, incluso cuando algo de N se haya aplicado a la siembra y puede ser usado como un método para definir la dosis que requiere el cultivo en el momento adecuado de aplicación, sin arriesgar a que el rendimiento disminuya y minimizando el riesgo de contaminación de los acuíferos. Para la variable forraje seco (t/ha) se determinó un modelo donde como ordenada al origen (0 ppm de $\text{NO}_3\text{--N}$) fue de 10.9337 t/ha y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 23.5 ppm de $\text{NO}_3\text{--N}$ con lo cual se producen 19.3 t/ha de forraje seco, por lo que se concluye que no existe respuesta a concentraciones de nitratos mayores a esta concentración y es la agrónomicamente apropiada. En esta localidad, la fertilización con nitrógeno en la etapa V6 en maíz si

no hay nitratos y se quiere producir máximos rendimiento se debe fertilizar con 172 kg de N/ha.

LITERATURA CITADA

- Agenda nacional de investigación, innovación y transferencia de tecnología agrícola 2017. <http://agenda2017.org/temas/ver/2#>
- Binford, G.D., A.M. Blackmer and M.E. Cerrato. 1992. Relation between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agron. J.* 84: 53-59.
- Bouwman, A. F., and L. J. M. Boumans. 2002. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem. Cycles* 16:1-13.
- Bundy, L.G., and T.W. Andraski. 1995. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. *J. Prod. Agric.* 8:561-568.
- Cole, C. V., J. Duxbury, J. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami, A. Mosier, K. Paustian, N. Rosenberg, N. Sampson, D. Sauerbeck, and Q. Zhao. 1997. Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 49:221-228.
- Dalal, R. C., W. Wang, G. P. Robertson, and W. J. Parton. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation



- options: A review. *Aust. J. Soil Res.* 41:165–195.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1974. *Soil map of the world*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France. 59 p.
- Fox, R.H., J.M. Kern, and W.P. Piekielek. 1986. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till maize yields and nitrogen uptakes. *Agron. J.* 78:741–746.
- Fox, R. H., G. W. Roth, K. V. Iverson, and W. P. Piekielek. 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81:971–974.
- Hergert, G.W. 1987. Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United States of America. p. 73–79. *In* J.R. Brown (ed.) *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation*. SSSA Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI.
- Ihnen, L.A. and J.H. Goodnight. 1985. The NLIN procedure. p. 575–606. *In* SAS User's guide: Statics, 5th ed. SAS Institutes Inc. Cary, N.C.
- Magdoff, F. R. 1991. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. *J. Prod. Agric.* 4:297–305.
- Magdoff, F. R., D. Ross and J. Amadon. 1984. A soil test for nitrogen availability for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1301–1304.
- Magdoff, F. R., W. E. Jokela, R. H. Fox, and G.F. Griffin. 1990. A soil test for nitrogen availability in the Northeastern U.S. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21:1103–1115.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. p. 391–416. *In* R.D. Hauck et al. (ed.) *Nitrogen in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Meisinger, J. J., V. A. Bandel, J. S. Angle, B. E. O'Keefe and C. M. Reynolds. 1992a. Pre-sidedress soil nitrate test evaluation in Maryland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1527–1532.
- Meisinger, J. J., F. R. Magdoff and J. S. Schepers. 1992b. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Underlying principles. p. 7–27. *In* B.R. Bock and K.R. Kelley (ed.) *Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions*. Proc. SSSA Symp., 28 Oct. 1991, Denver, CO. TVA Bull. Y-226. TVA, Muscle Shoals, AL.
- Monteny, G. J., A. Bannink, and D. Chadwick. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112:163–170.
- Paustian, K., B. A. Babcock, J. Hatfield, R. Lal, B. A. McCarl, S. McLaughlin, A. Mosier, C. Rice, G. P. Robertson, N. J. Rosenberg, C. Rosenzweig, W. H. Schlesinger, and D. Zilberman. 2004. Agricultural mitigation of greenhouse gases: Science and policy options. CAST Rep. R141. Council on Agricultural Science and Technology, Ames, IA.
- Rice, C.W., and J.L. Havlin. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendation. p. 1–13. *In* J.L.V. Havlin et al. (ed.) *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Publ. 40. SSSA, Madison, WI.
- Ritchie, S.W. and J.J. Hanway. 1982. How a maize plant develops. Coop. Ext. Service Spec. Rep. 48. Iowa State Univ. of Science and Technology. Ames, IA.
- Robertson, G.P. 2004. Abatement of nitrous oxide, methane and other non-CO₂ greenhouse gases: The need for a systems approach. p. 493–506. *In* C.B. Field and M.R. Raupach (ed.) *The global carbon cycle. Integrating humans, climate, and the natural world*. SCOPE 62, Island Press, Washington, DC.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverria, G.A. Studdert, and F.H. Andrade. 1999. No-tillage maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. *Agron. J.* 91:950–955.
- Sainz Rozas, H., H. E. Echeverria, G. A. Studdert and G. Dominguez. 2000. Evaluation of the pre-sidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176–1183.
- Schlesinger, W. H. 1999. Carbon sequestration in soils. *Science* 284:2095.
- Sims, J.T., B.L. Vasilas, K.L. Gartley, B. Miliken and V. Green 1995. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of Atlantic Coastal Plain. *Agron. J.* 87:213–222.



- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007. Agriculture. p. 496–540. *In* B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (ed.) *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- SAS Institute. 1988. *SAS/STAT User's guide*. Release 6.03 SAS Institutes Inc. Cary, N.C.
- Wells, K.L., and M.J. Bitzer. 1984. Nitrogen management in the no-till system. p. 535–549. *In* R.D. Hauck et al. (ed.) *Nitrogen in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Wells, K.L., W.O. Thom, and H.B. Rice. 1992. Response of no-till maize to nitrogen source, rate, and time of application. *J. Prod. Agric.* 5:607–610.