

Nitrogen fertilization dose through nitrate analysis at 30 cm soil depth in the V6 stage of corn. Location Lázaro Cárdenas, Chihuahua.

Dosis de fertilización nitrogenada mediante el análisis de nitratos a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V₆ del maíz. Localidad Lázaro Cárdenas, Chihuahua.

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

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

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

*Autor para correspondencia: hugouribem@hotmail.com

RESUMEN

El nitrógeno (N) es el nutriente que más a menudo limita la producción de cultivos, pero paradójicamente su uso inadecuado tiene un fuerte impacto en el ambiente (contaminación de acuíferos), donde altas dosis de fertilización y riego frecuente se utilizan para asegurar un óptimo crecimiento. La sobrefertilización como una forma segura contra la incertidumbre del nivel de N disponible (NO_3) que tiene el suelo es común, pero difícil de defender desde un punto de vista ambiental. En este estudio, los resultados mostraron que el análisis de $\text{NO}_3\text{-N}$ a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V₆ (PSNT) del cultivo de maíz, mediante el método de laboratorio de sulfato de brucina, 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 13.0585 t/ha y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 22.7 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$ con lo cual se producen 25.2 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 en el suelo y se quiere producir altos rendimiento se debe fertilizar con 248 kg de N/ha.

Palabras clave: Nitratos, maíz, PSNT.

ABSTRACT

Nitrogen (N) is the nutrient that most often limits crop production, but paradoxically its inappropriate use has a strong impact on the environment (aquifer contamination), where high doses of fertilization and frequent irrigation are used to ensure optimal growth. Overfertilization as a sure way against the uncertainty of the level of available N (NO_3) in the soil is common, but difficult to defend from an environmental point of view. In this study, the results showed that the analysis of $\text{NO}_3\text{-N}$ at 30 cm soil depth in the V₆ (PSNT) stage of the corn crop, using the brucine sulfate laboratory method, adequately reflects the availability of Soil N for corn, even when some N has been applied at planting 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 dry 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 13.0585 t/ha and as the intersection point or response threshold it was 22.7 ppm of $\text{NO}_3\text{-N}$, with which 25.2 t/ha of dry forage are produced, so it is concluded that there is no response to nitrate concentrations greater than this concentration and it is agronomically appropriate. In this location, nitrogen fertilization in the V₆ stage in corn, if there are no nitrates in the soil and high yields are to be produced, fertilize with 248 kg of N/ha.



Keywords: Nitrates, corn, PSNT.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el nutriente que más a menudo limita la producción de cultivos, pero paradójicamente su uso inadecuado tiene un fuerte impacto en el ambiente (contaminación de acuíferos), donde altas dosis de fertilización y riego frecuente se utilizan para asegurar un óptimo crecimiento. La sobrefertilización como una forma segura contra la incertidumbre del nivel de N disponible (NO_3) que tiene el suelo es común, pero difícil de defender desde un punto de vista ambiental.

Se ha detectado que el Nitrógeno en forma de nitrato (N-NO_3) de actividades agrícolas es contaminante tanto de los ecosistemas acuáticos superficiales como de las aguas subterráneas. El N mineral residual del suelo después de la cosecha (como un indicador del potencial de lixiviación de nitratos durante el otoño y el invierno) aumenta sustancialmente cuando se aplican cantidades superiores a la dosis óptima de N (Sogbedji *et al.*, 2000; Andraski *et al.*, 2000; Delgado *et al.*, 2001; Ladha *et al.*, 2005; Olfs *et al.*, 2005). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el agua potable no debe contener más de $10 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ ($50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$) (Organización Mundial de la Salud, 2004). Espino-Valdés *et al.* (2010) en un estudio en la región agrícola de Delicias, Chihuahua, encontraron en la zona rural, cinco pozos (29 % del total) con concentraciones fuera de norma. El rango de variación comprendió desde 4.1 hasta $21.8 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$. En la zona urbana fueron 10 pozos (el 45% del total) los que superaron la norma, donde las concentraciones fluctuaron de 3.6 a $22.3 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$, concluyendo que el 38 % del total de los pozos de agua potable estudiados presentaron concentración de nitratos por encima del valor límite establecido en la norma de agua potable, por lo que existe contaminación difusa por nitratos en el agua subterránea del área de estudio. El análisis isotópico, indica que la presencia de altas concentraciones de nitratos en el área rural del municipio de Delicias se debe a la combinación de residuos de fertilizantes con desechos orgánicos procedentes de escurrimientos de fosas sépticas y/o residuos animales, mientras que en la zona urbana, la contaminación difusa por nitratos corresponde a la zona de mayor extracción de agua subterránea y se relaciona con la presencia de residuos orgánicos de

origen animal. Por lo que se recomienda entre otras cosas, promover la dosificación adecuada de fertilizantes y el uso eficiente del agua en el riego para reducir el volumen de lixiviación en el acuífero.

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 (EUN) puede reducir las emisiones de N_2O e indirectamente reducir emisiones de GEI del N fabricado como fertilizante (Schlesinger, 1999). El nitrógeno en forma de nitrato en el agua, aparte de ser el máximo responsable del proceso de eutrofización, también es el causante de diferentes enfermedades como la metahemoglobinemia, el cáncer de esófago y estómago.

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 a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V6 del maíz también llamado PSNT o el uso de Greenseeker); 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 años, sobre todo por el incremento del precio 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.

Este trabajo tuvo como objetivos identificar mediante el PSNT los valores críticos de nitratos en el suelo a partir de los cuales no hay respuesta a la fertilización nitrogenada y generar recomendaciones de N en maíz para obtener máximos rendimientos de forraje y grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un suelo Yermosol cálcico (FAO/UNESCO, 1974) en el sitio experimental Lázaro Cárdenas ($28^{\circ}24'13''\text{N}$; $105^{\circ}30'47''\text{W}$) perteneciente 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), NO_3 (ppm), P (ppm), K (ppm), Fe (ppm), Zn (ppm), Cu (ppm) y Mn (ppm) fue franco arcilloso-arenoso, 8.4, 1.10, 0.95, 11.5, 19.4, 428, 4.8, 2.3, 0.8 y 5.0. El lugar tiene a una altitud sobre el nivel del mar de 1150 metros, el cual tiene un clima seco semicálido. En el año 2022, los meses de mayo, junio y julio tuvieron temperaturas máximas diarias muy similares de alrededor de 35°C , las cuales están por encima de la temperatura umbral (T_u) para maíz (30°C). La temperatura óptima (T_o) para el desarrollo del maíz es de entre 24 y 30°C . Parte de agosto, septiembre y octubre estuvieron en el rango de temperaturas óptimas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Precipitación pluvial total de cada mes y valores promedio de temperaturas, humedad relativa y evapotranspiración diarias en el sitio experimental Lázaro Cárdenas. 2022. INIFAP-Delicias.

Variables climáticas	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Precipitación total (mm)	1.9	14.6	9.3	120.5	17.0	76.0	0.0
Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$)	35.98	35.96	35.13	32.44	30.18	27.03	23.17
Temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$)	15.28	19.39	19.82	19.13	15.86	10.14	3.28
Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$)	26.64	28.45	27.36	25.31	22.55	17.98	12.78
Humedad Relativa diaria	24.88	43.72	58.15	72.63	77.67	71.87	57.73
Evapotranspiración diaria (mm)	7.22	7.62	6.54	5.23	4.45	3.87	3.01

Se sembró el 30 de junio el híbrido Antílope de cultivo fue asperjado en las etapas V_2 (13 DDS) y V_4 (26 DDS) con una población de 92,000 plantas/ha. El (26 DDS) con una solución foliar de 6% y 0.5% de

SO₄ Fe y SO₄ Zn, respectivamente, para evitar clorosis férrica. Ahí mismo se aplicaron 80 ml/ha de insecticida Ampligo (Rynaxipir+Lamdaclotrina)) para controlar Gusano cogollero *Spodoptera frugiperda*. El cultivo recibió un riego de presiembra (20 junio) y dos riegos de auxilio al inicio del ciclo (31 de julio y 16 de agosto) y posteriormente hubo lluvia bien distribuida a partir del 18 de agosto hasta el 5 de septiembre. Por último, se dio un tercer riego el 14 de septiembre y se complementó el cultivo con lluvia en octubre.

Las parcelas experimentales constaron de cuatro surcos de 0.8 m de ancho y 12 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 otros tres m lineales de plantas (4.8 m²) para estimar rendimiento de grano.

Cuadro 2. Tratamientos de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz utilizados para el análisis de nitratos en el suelo.

2022. 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	0	225	225
12	Estiércol (60 t/ha)	0	243 ^y
13	Biosólidos (10 t/ha)	0	200 ^z
14	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 (Egball *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).

Para N-NO₃ se muestreó después de que el cultivo se estableció y justo antes de que iniciara el crecimiento rápido de la planta (V₆ o 30 DDS) 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 de los tratamientos 1 al 6 (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 42 muestras de suelo en cada localidad, en siete

Los tratamientos fueron diseñados pensando 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 permitieran determinar el umbral de concentración de NO₃ (en ppm) del suelo donde hay respuesta a la fertilización nitrogenada (tratamientos del 1 al 6 en el cuadro 2); también, conocer el momento adecuado de aplicación de fertilizante nitrogenado para obtener el máximo rendimiento (tratamientos del 7 al 11 en el cuadro 2); además, se adicionaron dos tratamientos con materiales orgánicos (estiércol y biosólidos) producidos en la región, comúnmente aplicados en la agricultura, aplicados en cantidades que se supone satisfacen los requerimientos de N del cultivo y un testigo absoluto. Los tratamientos del 1 al 12 fueron aplicados con 80 kg/ha de P₂O₅ al momento de la siembra.

repeticiones de cada tratamiento y poder correlacionarlos con el rendimiento de forraje para silo o rendimiento de grano. Las muestras de suelo se secaron al aire, se tamizaron y se mandaron al laboratorio para su análisis. El diseño experimental fue bloques al azar con siete repeticiones. Se analizaron nitratos en el suelo mediante el método del sulfato de brucina, antes de que inicie 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, 2023). El experimento también se analizó como un factorial, donde época de aplicación de N (aplicación de N a la siembra y en V₆) y dosis de N (45, 90, 135, 180 y 225 kg/ha de N) fueron los factores. Se midieron rendimiento de forraje para silo, forraje seco y grano en maíz. Estos rendimientos se correlacionaron con la concentración de NO₃ en el suelo para determinar el umbral de NO₃ mediante los modelos de superficie de respuesta del tipo lineal segmentado con el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS.

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 12.4 ppm cuando no se aplicó N hasta 19.6 ppm donde se aplicó 135 kg/ha de N. Se observaron incrementos de 2.6 ppm por cada 45 kg de N/ha aplicado. Se puede observar que el suelo utilizado en el experimento poseía una cantidad pobre de nitratos residual de alrededor de 10.8 ppm como lo muestra el tratamiento testigo (14) del cuadro 3, este contenido de nitratos es común en suelos pobres como cuando se siembra maíz continuamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cuadro 3 muestra las diferentes dosis de N aplicados antes de la siembra de maíz (tratamientos

Cuadro 3. Tratamientos de N aplicados en la siembra y concentración de NO₃ (ppm) en el suelo en la etapa V₆ del maíz de siete repeticiones en el sitio experimental “Lázaro Cárdenas”. 2022. INIFAP-Delicias.

N Fertilización (kg/ha)		No. Tratamiento	Repetición							Promedio
Siembra	V ₆		I	II	III	IV	V	VI	VII	
0	0	1	12.7	15.4	11.5	10.7	12.9	10.5	12.9	12.4
45	0	2	12.8	18.6	13.7	11.2	13.2	16.6	13.3	12.8
90	0	3	20.1	28.1	15.0	13.2	14.2	19.1	13.4	17.6
135	0	4	22.2	28.3	16.7	16.0	17.1	20.8	16.4	19.6
180	0	5	26.6	28.7	21.2	21.9	23.0	24.7	17.1	23.3
225	0	6	28.3	29.6	23.2	22.6	29.4	24.7	21.5	25.6
Testigo		14	12.0	11.5	9.7	10.0	11.5	9.6	11.6	10.8

Las variables estudiadas en maíz respondieron positivamente a la aplicación de N como se muestra en el cuadro 4, donde se observaron incrementos de alrededor de 10, 6.5, 1.5 y 3.5 t/ha de forraje fresco para silo, forraje seco, peso seco de grano de elote y peso de grano, respectivamente, comparando el tratamiento sin N vs la aplicación de 180, 225 kg/ha de N o 60 t/ha de estiércol. La respuesta de todas las variables a la aplicación de estiércol como fuente de N para el maíz fue igual estadísticamente a la aplicación de 180 o 225 kg de N/ha, pero no así para la aplicación de biosólidos (Cuadro 4).



Cuadro 4. Tratamientos de N y comparación de medias de rendimiento de forraje fresco para silado, forraje seco, peso seco de grano de elote y peso de grano en el sitio experimental “Lázaro Cárdenas”. 2022. INIFAP-Delicias.

Tratamiento	N Fertilización (kg/ha)		Forraje fresco para silo (t/ha)	Forraje seco (t/ha)	Peso seco de grano de elote (t/ha)		Peso de grano (t/ha)
	Siembra	Etapas V6					
1	0	0	34.6 ef	19.6 fg	6.5 def	6.1 ef	
2	45	0	37.6 cdef	20.3 efg	6.5 def	7.0 def	
3	90	0	38.4 cdef	21.6 defg	6.3 fg	8.1 cd	
4	135	0	40.5 abcd	22.5 cdef	7.7 abcd	8.5 abc	
5	180	0	41.6 abcd	25.7 ab	7.4 abcdef	9.6 a	
6	225	0	44.5 ab	26.1 ab	8.1 ab	8.7 abc	
7	0	45	36.6 def	19.2 fg	6.5 def	7.1 de	
8	0	90	39.2 bcde	21.4 def	6.9 cdef	7.9 cd	
9	0	135	41.1 abcd	23.9 bcd	8.0 abc	8.4 abc	
10	0	180	44.4 ab	27.2 a	8.4 a	9.5 ab	
11	0	225	42.4 abc	24.9 abc	7.2 bcdef	9.5 ab	
12	Estiércol		45.7 a	25.5 ab	7.6 abcde	8.8 abc	
13	Biosólidos		37.8 cdef	21.3 def	7.0 bcdef	8.5 abc	
14	Testigo		33.4 f	18.3 g	5.3 g	6.0 f	
DMS			5.5	2.7	1.2	1.2	

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

Es importante resaltar que la aplicación de 135 kg de N/ha fue igual estadísticamente en todas las variables estudiadas al tratamiento con mayor rendimiento donde para forraje fresco fue el estiércol y para las demás variables fue 180 kg de N/ha, sobre todo cuando se aplicó en la etapa V₆. Esto nos permite la posibilidad de utilizar la dosis de 135 kg/ha de N para fertilizar el maíz e impactar menos el medio ambiente, sin la disminución significativa del rendimiento (el rendimiento se reduce alrededor de 10%). La fertilización con nitrógeno en V₆ en maíz (Ritchie y Hanway, 1982) es más eficiente que la aplicación a la siembra, sobre todo 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 la 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 NO₃ en el suelo en V₆ (PSNT) han demostrado una buena correlación entre el rendimiento del grano de maíz y el contenido de NO₃-N de la superficie del suelo cuando las plantas están en V₄ a V₆ (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).

El trabajo experimental se analizó estadísticamente como un factorial, donde época de aplicación de N (aplicación de N a la siembra y en V_6) y dosis de N (45, 90, 135, 180 y 225 kg/ha de N) fueron los factores. El análisis de varianza mostro que no hubo diferencia significativa entre fertilizar con nitrógeno a la siembra o en V_6 , sin embargo en la dosis de N si hubo diferencia significativa, siendo mejor en el rendimiento de forraje seco y grano la aplicación de 180 y 225 kg/ha de N que el resto de tratamientos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de medias de rendimiento de forraje fresco para silo, forraje seco, peso seco de grano de elote y peso de grano en el sitio experimental “Lázaro Cárdenas” analizando estadísticamente el experimento como factorial. 2022. INIFAP-Delicias.

Tratamientos	Forraje fresco para silo (t/ha)	Forraje seco (t/ha)	Peso seco de grano de elote (t/ha)	Peso de grano (t/ha)
45	37.071 c	19.747 d	6.491 b	7.042 d
90	38.792 bc	21.533 c	6.599 b	8.019 c
135	40.789 ab	23.231 b	7.804 a	8.452 bc
180	43.001 a	26.403 a	7.898 a	9.512 a
225	43.469 a	25.534 a	7.627 a	9.113 a
DMS	3.644	1.621	0.727	0.695
Aplicación de N a la siembra	40.514 a	23.255 a	7.194 a	8.379 a
Aplicación de N en V_6	40.734 a	23.324 a	7.374 a	8.476 a
DMS	2.305	1.025	0.460	0.440

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

El objetivo general de este trabajo fue validar el método de análisis de nitratos del suelo en la etapa V_6 en maíz para definir dosis y épocas de fertilización nitrogenada en maíz bajo riego por gravedad, pero como objetivo específico se tuvo el de determinar el umbral de la concentración de nitratos del suelo (ppm de NO_3) en que hay respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz. Para lograr los objetivos planteados se analizó el comportamiento de diferentes variables de producción como: Forraje fresco para silo; Forraje seco; Peso seco de grano de elote; y Peso de grano de maíz, todas estas variables en función de la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la etapa V_6 del cultivo, simulados por la aplicación de dosis crecientes de N (0, 45, 90, 135, 180 y 225 kg/ha), en 42 parcelas generadas a partir de seis tratamientos por siete repeticiones. En todas las superficies de respuesta de las variables estudiadas se notaban dos

áreas definidas; una con una fuerte respuesta del rendimiento desde 10 hasta alrededor de 22 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$; y en la segunda área los rendimientos desde 22 hasta 30 ppm $\text{NO}_3\text{-N}$ fueron similares, por lo que fue necesario definir estadísticamente el punto que delimita las dos áreas (figura 1). Para ello, se obtuvieron modelos de superficie de respuesta del tipo lineal segmentado para cada una de las variables estudiadas como se muestra en el cuadro 6, donde el umbral de respuesta varió desde 15.8 hasta 22.7 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$.

De las variables estudiadas, la variable más importante es el forraje seco, esto debido a que uniformiza el peso independientemente del agua que contengan los tratamientos, es decir es independiente de cuando se haya cosechado el cultivo para forraje, normalmente se cosecha para ensilaje cuando el maíz para forraje tiene un 35% de



materia seca. Otra razón porque el forraje seco es importante como variable, es que la determinación de concentración de N dentro de la planta se reporta en base seca y este es fundamental para el cálculo de las necesidades fertilizantes. 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 13.0585 y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 22.7 ppm de $\text{NO}_3\text{-N}$ con lo cual se producen 25.214 t/ha de forraje seco (figura 1). Con los datos mostrados, se concluye que no existe respuesta a

Cuadro 6. Modelos de superficie de respuesta del tipo Lineal segmentados generados para las distintas variables estudiadas en el sitio experimental “Lázaro Cárdenas”. 2022. INIFAP-Delicias.

Variable	A (Ordenada al Origen)	B (Pendiente)	Umbral de respuesta	F	Pr>F	R ²
Forraje fresco para silo	19.0942	1.3209	17.1	18.66	0.0001	0.45
Forraje seco	13.0585	0.5355	22.7	49.91	0.0001	0.68
Peso Seco Grano Elote	1.5014	0.3760	15.8	11.06	0.0001	0.32
Peso Grano Maíz	1.3097	0.4322	17.1	27.46	0.0001	0.54

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) e indican que bajo las condiciones de suelo y ambiente en esta localidad antes de la etapa V₆ del maíz, el análisis de $\text{NO}_3\text{-N}$ del suelo a 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 V₆ 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

concentraciones mayores de nitratos en el suelo de 22.7 ppm, por lo que agrónomicamente esta es la apropiada.

Se observaron relaciones estrechas ($R^2 = 0.32$ a 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 V₆ del maíz, en el sitio experimental Lázaro Cárdenas del INIFAP (cuadro 6).

que caen en el cuadrante superior izquierdo confirman esta idea (cuatro puntos, Figura 1). Por otro lado, los pocos puntos (seis 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 V₆ no fueron importantes bajo las condiciones de este experimento.

Relación entre forraje seco y NO_3 en el suelo en V₆ en maíz

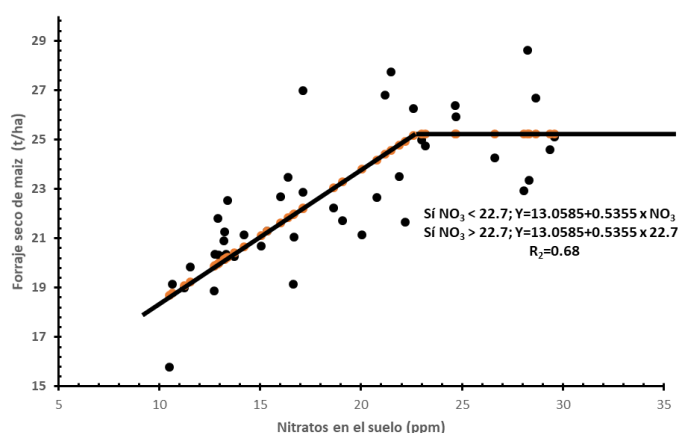


Figura 1. Rendimiento de forraje seco (t/ha) en respuesta a la concentración de NO_3 (ppm) en el suelo en la etapa V₆ del maíz en el sitio experimental Lázaro Cárdenas. 2022. INIFAP-Delicias.

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. Calculo de rendimiento de forraje seco ajustado y necesidades fertilizantes en base a los resultados generados en el sitio experimental Lázaro Cárdenas. 2022. INIFAP-Delicias.

Forraje seco (t/ha) $Y=13.0585+0.5355(NO_3)$	Forraje fresco para silo (t/ha) $Y=19.0942+1.3209(NO_3)$	Fertilizante nitrogenado (kg/ha) $Nf= (RM-RP)20.5$
$Y=13.0585+0.5355(0)=13.1$	$Y=19.0942+1.3209(0)=19.1$	$Nf= (25.2-13.1)20.5=248$
$Y=13.0585+0.5355(3)=14.7$	$Y=19.0942+1.3209(3)=23.1$	$Nf= (25.2-14.7)20.5=215$
$Y=13.0585+0.5355(6)=16.3$	$Y=19.0942+1.3209(6)=27$	$Nf= (25.2-16.3)20.5=183$
$Y=13.0585+0.5355(9)=17.9$	$Y=19.0942+1.3209(9)=31$	$Nf= (25.2-17.9)20.5=150$
$Y=13.0585+0.5355(12)=19.5$	$Y=19.0942+1.3209(12)=34.9$	$Nf= (25.2-19.5)20.5=117$
$Y=13.0585+0.5355(15)=21.1$	$Y=19.0942+1.3209(15)=38.9$	$Nf= (25.2-21.1)20.5=84$
$Y=13.0585+0.5355(18)=22.7$	$Y=19.0942+1.3209(17.1)=41.7$	$Nf= (25.2-22.7)20.5=51$
$Y=13.0585+0.5355(21)=24.3$		$Nf= (25.2-24.3)20.5=19$
$Y=13.0585+0.5355(22.7)=25.2$		$Nf= (25.2-25.2)20.5=0$

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

Cuadro 8. Generación de recomendaciones de fertilización nitrogenada en maíz forrajero, en base al contenido de N-NO₃ en el suelo en la etapa V₆ y el potencial del cultivo en el sitio experimental Lázaro Cárdenas. 2022. INIFAP-Delicias.

NO ₃ suelo	Forraje seco de maíz (t/ha)								
	13.1	14.7	16.3	17.9	19.5	21.1	22.7	24.3	25.2
ppm	Fertilizante adicional (kg/ha de N)								
0	0	33	65	98	130	163	195	228	248
3		0	33	65	98	130	163	195	228
6			0	33	65	98	130	163	195
9				0	33	65	98	130	163
12					0	33	65	98	130
15						0	33	65	98
18							0	33	65
21								0	33
22.7									0

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que el análisis de NO₃-N a 30 cm de profundidad del suelo en la etapa V₆ (PSNT) del cultivo de maíz, mediante el método de

laboratorio de sulfato de brucina, 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 13.0585 t/ha y como punto de intersección o umbral de respuesta fue 22.7 ppm de $\text{NO}_3\text{--N}$ con lo cual se producen 25.2 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 agronómicamente 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 248 kg de N/ha.

LITERATURA CITADA

- 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.
- Delgado, J. A., R. J. Ristau, M. A. Dillon, H. R. Duke, A. Stuebe, R. F. Follett, M. J. Shaffer, R. R. Riggensbach, R. T. Sparks, A. Thompson, L. M. Kawanabe, A. Kunugi, and K. Thompson. 2001. Use of innovative tools to increase nitrogen use efficiency and protect environmental quality in crop rotations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32:1321-1354.
- Espino-Valdés, M. S., C. J. Navarro-Gómez y M. Royo-Ochoa. 2010. Evaluación del origen de nitratos en el agua subterránea de Delicias, Chihuahua, usando técnicas isotópicas. *Administración y tecnología para el diseño. Anuario* 2010. p. 239-248.
- 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.
- Ladha, J. K., H. Pathak, T.J. Krupnik, J. Six, and C. van Kessel. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87:85-156.
- 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.
- 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., F. R. Magdoff and J. S. Schepers. 1992. 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.
- Olfs, H. W., K. Blankenau, F. Brentrup, J. Jasper, A. Link, and J. Lammel. 2005. Soil and plant-based nitrogen fertilizer recommendations in

- arable forming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168:414–431.
- 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 presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176–1183.
- SAS Institute. 2023. SAS/STAT User's guide. SAS Institutes Inc. Cary, N.C.
- 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.
- Sogbedji, J. M., H. van Es, C. Yang, L. D. Geohring, and F. R. Magdoff. 2000. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *J. Environ. Qual.* 29:1813–1820.
- 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

