

CALIBRACIÓN DEL SPAD-502 PARA EVALUAR REQUERIMIENTOS DE NITRÓGENO EN MAÍZ FORRAJERO

SPAD-502 Calibration to Evaluate Nitrogen Requirements in Forage Corn

Anselmo González-Torres¹, Uriel Figueroa-Viramontes^{2†}, Jorge A. Delgado³, Gregorio Núñez-Hernández², José A. Cueto-Wong⁴, Pablo Preciado-Rangel⁵ y Arturo Palomo-Gil¹

RESUMEN

En el presente estudio se calibró un equipo SPAD con el objetivo de evaluar la relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) y el rendimiento de maíz forrajero, así como para generar ecuaciones de regresión preliminares para estimar requerimientos de nitrógeno (N). Se evaluaron dosis crecientes de N en un suelo franco arcillo arenoso durante 2007 y 2008. Se tomaron lecturas con el SPAD antes de cada riego y se estimó el ISN. Se realizaron análisis de regresión entre el rendimiento relativo (RR) e ISN contra la dosis de N, como fertilizante + N residual en el suelo (N_{f+s}). El rendimiento de maíz forrajero en función del N_{f+s} se ajustó a una ecuación cuadrática. De acuerdo con la ecuación obtenida, el valor de N_{f+s} para alcanzar el 95% del RR máximo fue de 325 kg ha⁻¹. Los resultados estimados con el SPAD estuvieron relacionados con los rendimientos obtenidos. Los valores r^2 que relacionan el N_{f+s} y el ISN variaron de 0.78 a 0.99. Sin embargo, cuando los datos de ISN de la primera fecha de muestreo en ambos años fueron combinados, la r^2 fue de 0.692 y la ecuación fue: $ISN = -2 \times 10^{-6} (N_{f+s})^2 + 0.0012(N_{f+s}) + 0.77$. Se requiere un número mayor de estudios para calibrar y validar el uso del SPAD con fines de recomendación a escala comercial en maíz forrajero.

Palabras clave: índice de suficiencia de N, N foliar, N residual.

SUMMARY

In this study SPAD equipment was calibrated to evaluate the relationship between nitrogen sufficiency index (NSI) and corn forage yield and to generate preliminary regression equations to estimate the nitrogen (N) requirement of silage corn. Increasing N rates were evaluated in a sandy clay loam soil during 2007 and 2008. SPAD readings were taken before every irrigation event and the NSI was estimated. Regression analyses were computed between relative yield (RY) and NSI against N rate + residual soil N (N_{f+s}). Dry matter yield followed a quadratic equation as a function of N_{f+s} . According to the quadratic equation, the N rate + residual soil N to achieve 95% of the maximum relative yield was 325 kg ha⁻¹. SPAD readings were related to dry matter yield. Values of r^2 for the relationship between N rate and NSI varied from 0.78 to 0.99. However, when NSI data measured at the first sampling date in both years were combined, the r^2 was 0.692, and the equation was: $NSI = -2 \times 10^{-6} (N_{f+s})^2 + 0.0012 (N_{f+s}) + 0.77$. More studies are required to calibrate the SPAD in order to recommend it for commercial purposes in silage corn.

Index words: N sufficiency index, foliar N, soil residual N.

INTRODUCCIÓN

La Comarca Lagunera es la principal región productora de leche del país, con más de 400 mil cabezas de ganado lechero. En el 2008 se sembraron 129 mil ha en esta región, de las cuales el 73% se ocuparon con cultivos forrajeros. El maíz para ensilaje es el segundo cultivo forrajero después de alfalfa y representa el 30% de la superficie cosechada con forrajes (SAGARPA, 2009). En las unidades de producción de forraje-leche es importante planificar la fertilización de los cultivos, ya que el estiércol que se genera representa un fertilizante y un abono orgánico para el suelo. Sin embargo, la práctica común es incorporar dosis

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - UL. Periférico y Carretera a Santa Fé s/n. 27059 Torreón, Coah., México.

² Campo Experimental La Laguna, INIFAP. Blvd. José Santos Valdés 1200 Pte. Col. Centro. 27440 Matamoros, Coah., México.

[†] Autor responsable (figueroa.uriel@inifap.gob.mx)

³ Soil Plant Nutrient Research, USDA-ARS. Fort Collins, CO, USA.

⁴ INIFAP, CENID-RASPA. Km 6.5 Margen Derecha Canal de Sacramento. 35150 Gómez Palacio, Durango, México.

⁵ Instituto Tecnológico de Torreón. Km 7.5 Carretera Torreón-San Pedro. Apartado Postal 42, 27070 Torreón, Coah., México.

variadas de estiércol al suelo y, adicionalmente, aplicar fertilizantes químicos, sin criterios técnicos basados en demanda de N del cultivo y suministro del suelo (Castellanos *et al.*, 1996). Existen diversos métodos para determinar requerimientos de N en los cultivos, desde los que emplean un balance entre demanda y suministro de N (Palma *et al.*, 2002), los cuales requieren de análisis de laboratorio; otros métodos utilizan equipos portátiles, como el medidor de nitratos en savia (Rangel *et al.*, 2002), el estimador de clorofila (Varvel *et al.*, 2007), hasta sensores remotos (Solari *et al.*, 2008). El SPAD-502 (Minolta Camera Co., Japan) es un equipo portátil, no destructivo, que determina el verdor de las hojas y cuyas lecturas tienen una alta correlación con el contenido de N en la planta (Sainz-Rozas y Echeverría, 1998; Zebarth *et al.*, 2002). Lo anterior permite utilizar el SPAD para diagnosticar requerimientos de N en cultivos (Varvel *et al.*, 2007). Sainz-Rozas y Echeverría (1998) usaron el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN), que es el resultado de dividir el valor SPAD promedio de cada tratamiento entre el valor SPAD promedio más alto, para diagnosticar deficiencias de N en diferentes etapas del cultivo de maíz para grano. En sus resultados encontraron coeficientes de determinación (r^2) de 0.46 a 0.87 entre el ISN y el rendimiento relativo (RR) y concluyeron que el SPAD fue más adecuado para diagnosticar deficiencias de N en etapas posteriores a emisión de la sexta hoja (V6). Por ejemplo, la ecuación de regresión que predice el RR con la lectura SPAD a los 50 días después de la siembra (DDS) fue: $RR = 0.03(\text{SPAD}) - 0.75$ ($r^2 = 0.88$), con un valor SPAD de 57.0 para alcanzar el RR máximo. Es importante contar con calibraciones para el uso del SPAD en diferentes etapas de cultivo, ya que una de las maneras de aumentar la eficiencia de uso del N es mediante aplicaciones fraccionadas (Randall y Mulla, 2001). En el caso de la Comarca Lagunera, es común la aplicación de una parte de N a la siembra y aplicaciones complementarias antes del primer y segundo riego de auxilio.

Varvel *et al.* (2007) evaluaron el equipo SPAD para generar recomendaciones de fertilización en maíz de grano; la ecuación que obtuvieron fue: $ISN = 0.8073 + 0.002X - 0.0000056X^2$, donde X es la dosis de N en kg ha^{-1} . Teóricamente, el $ISN = 1.0$ se relaciona con la cantidad de N (X) para obtener un RR máximo, que en la ecuación anterior es de 179 kg ha^{-1} . Con una ecuación de este tipo se puede estimar la cantidad de N (kg ha^{-1}) presente en el suelo a un valor medido de $ISN < 1.0$; por lo tanto, la diferencia entre el valor

de N (kg ha^{-1}) cuando el $ISN < 1.0$ y el N (kg ha^{-1}) cuando el $ISN = 1.0$, será la dosis de N (kg ha^{-1}) que se requiere aplicar para obtener el RR máximo.

En algunos trabajos de investigación se han encontrado inconsistencias en los resultados del SPAD con fines de generar recomendaciones de fertilización. Al trabajar con maíz forrajero, Zebarth *et al.* (2002) señalan que la relación entre el ISN medido en la etapa de emisión de la sexta hoja (V6) y la concentración de N foliar fue inconsistente entre años, aunque el ISN logró identificar con un 68% de acierto, predios que respondieron a la aplicación de N a un valor SPAD crítico menor de 43.7. Estos autores recomiendan el uso del SPAD para identificar predios que no requieren fertilización adicional, sobre todo en suelos con exceso de N por el uso de estiércol. Lo anterior es importante en regiones como La Comarca Lagunera, donde se aplica estiércol y fertilizantes para la producción de cultivos forrajeros. Sainz-Rozas y Echeverría (1998) obtuvieron inconsistencias entre años al relacionar el RR con las lecturas del SPAD y señalan que puede deberse a diferencias en la temperatura ambiente entre los años de evaluación. Otro factor que afecta las lecturas del SPAD es la hora del día en que se toman, ya que tienden a ser menores en condiciones de alta radiación, como a mediodía, y mayores después del amanecer y antes de oscurecer, cuando la radiación es menor (Hoel y Solhaug, 1998). Dado que no se cuenta con información local, los objetivos del presente estudio fueron evaluar la relación entre los valores del SPAD antes de cada riego de auxilio y el rendimiento de maíz forrajero, y generar ecuaciones preliminares que permitan estimar requerimientos de N en maíz forrajero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental La Laguna del INIFAP, en Matamoros, Coahuila, durante el ciclo primavera-verano de 2007 y 2008. El suelo es de textura franco arcillo arenosa hasta 60 cm de profundidad; otras propiedades del suelo se anotan en el Cuadro 1. Todos los análisis de suelo se realizaron de acuerdo a los métodos descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Se utilizó maíz forrajero de la variedad SB-302, la cual se sembró el 3 de mayo en 2007 y el 19 de mayo en 2008, en parcelas de 10 m de ancho por 15 m de largo. El diseño experimental fue bloques completos al azar

Cuadro 1. Propiedades del suelo al inicio del estudio en 2007 y contenido de nitratos al inicio del 2008.

Propiedad	Unidad	Profundidad	
		0 - 30	30 - 60
		- - - - cm - - - -	
pH		8.24	8.58
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0.41	0.36
Materia orgánica	%	1.20	0.64
Fósforo	mg kg ⁻¹	14.30	4.06
Nitrato (2007)	mg kg ⁻¹	9.68	9.15
Nitrato (2008)	mg kg ⁻¹	7.38	6.96
Arena	%	51.69	61.42
Arcilla	%	27.91	22.78
Clase textural		franco arcillo arenoso	franco arcillo arenoso

con cuatro repeticiones. Todas las parcelas recibieron 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con ácido fosfórico como fuente (52% de P₂O₅). Las dosis de N evaluadas se anotan en el Cuadro 2. La dosis de 300 kg ha⁻¹ en 2007 se estimó mediante un método de balance (Palma *et al.*, 2002) para una meta de rendimiento de 16 Mg ha⁻¹ de MS, considerando una extracción del cultivo de 14 kg de N por Mg de MS (Faz *et al.*, 2006), N residual en el suelo de 75 kg ha⁻¹ y una eficiencia de uso de N de 60%. Los demás tratamientos representaron 0, 33, 67 y 133% de la dosis de N + N residual (N_{F+S}). En el ciclo otoño-invierno 2007-2008 se cultivó avena forrajera sin fertilizar con el objetivo de bajar y uniformizar la concentración de nutrientes en el suelo; el N residual después de la cosecha de avena fue 50 kg ha⁻¹. Como la fecha de siembra en 2008 fue más tarde, la meta de rendimiento de forraje en el segundo año fue de 15 Mg ha⁻¹ de MS y se consideró un 65% de eficiencia de uso de N, porque las dosis se fraccionaron hasta en cuatro aplicaciones (Cuadro 2). Con los cambios anteriores, la dosis de N para obtener la meta de rendimiento en 2008 fue de 270 kg ha⁻¹. En 2007 las dosis de N se fraccionaron hasta en tres aplicaciones, antes de cada uno de los tres primeros riegos de auxilio. El porcentaje de la dosis de N aplicado en cada riego se anota en el Cuadro 2. La fuente de N fue sulfato de amonio (20.5% de N), el cual fue disuelto en agua antes de aplicarlo en el riego.

Se utilizó un sistema de tubería con multicompuertas para aplicar el riego. En ambos ciclos se aplicó un riego de presiembra o aniego, luego en 2007 se aplicaron cuatro riegos de auxilio, a los 21, 40, 57 y 73 días después

de la siembra (DDS), mientras que en 2008 fueron cinco riegos, a los 17, 33, 53, 67 y 84 DDS. Las lecturas SPAD se tomaron un día antes de cada riego en 10 plantas por parcela. Cada medición se realizó en la hoja más joven completamente expandida, en la parte media entre la base y el ápice y a la mitad entre la nervadura central y el borde de la hoja. Los valores SPAD se transformaron en valores de ISN, como se describió en párrafos anteriores (Sainz-Rozas y Echeverría, 1998; Varvel *et al.*, 2007). La cosecha se realizó a los 97 DDS en 2007 y a los 99 DDS en 2008, en la etapa de madurez del grano de un tercio de avance de la línea de leche (Nuñez *et al.*, 2005). El rendimiento de forraje verde se estimó en una parcela útil de dos surcos centrales por 10 m de largo. Para expresar el rendimiento en materia seca, el porcentaje de humedad se calculó en una muestra de tres plantas por parcela, las cuales fueron pesadas en fresco y luego secadas en estufa hasta peso constante; la MS promedio en 2007 fue de 37.5% y en 2008 de 35.3%. Para el análisis de N en planta se tomó una muestra de la parte aérea de cinco plantas por parcela y se analizó el N total en la planta completa por el método de Kjeldahl (Jones, 2001). Se realizaron análisis de varianza de las variables evaluadas. La relación entre las dosis de fertilización y las variables en estudio, incluyendo el rendimiento, se ajustó a una ecuación cuadrática mediante análisis de regresión lineal. Para los análisis estadísticos se utilizó el SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2003).

Cuadro 2. Dosis de N y porcentaje de la dosis aplicado a la siembra o en el riego de auxilio.

Dosis de N	Época de aplicación			
	Siembra	1 ^{er} riego	2 ^{do} riego	3 ^{er} riego
kg ha ⁻¹	- - - - % N - - - -			
	2007			
0				
50		100		
175		60	40	
300		50	35	15
425		50	35	15
	2008			
0				
57	15	85		
163	15	45	40	
270	15	40	35	10
377	15	40	35	10

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de MS mostró diferencias significativas por efecto de las dosis de N (Cuadro 3). En 2007 los rendimientos fueron estadísticamente iguales en todos los tratamientos que recibieron alguna dosis de N y superaron al tratamiento sin N. En el segundo año, las dosis de 270 y 377 kg ha⁻¹ de N superaron a los tratamientos con dosis menores de N. Los rendimientos más altos se obtuvieron con 300 kg ha⁻¹ en 2007 y con 270 kg ha⁻¹ en 2008, lo que comprueba que se alcanzó la meta de rendimiento en cada año al estimar la dosis de N con el método de balance (Palma *et al.*, 2002; Faz *et al.*, 2006). El rendimiento promedio en 2007 fue de 15.8 Mg ha⁻¹ y disminuyó a 13.0 Mg ha⁻¹ en 2008 debido a que la fecha de siembra fue más tarde con respecto a 2007 (Lauer *et al.*, 1999). El contenido de N total en planta no fue diferente estadísticamente entre tratamientos en 2007, mientras que en 2008 se observaron valores mayores de N en planta en las dosis más altas de N al suelo. Zebarth *et al.*, (2002) señalan

Cuadro 3. Rendimiento de materia seca (MS) y concentración de nitrógeno (N) total en planta de maíz forrajero en respuesta a dosis de N.

Dosis de N		Rendimiento de MS		N total en planta	
2007	2008	2007	2008	2007	2008
-- kg ha ⁻¹ --		-- Mg ha ⁻¹ --		-- % --	
0	0	12.1 b [†]	9.5 c	0.74	0.64 bc
50	57	15.2 ab	12.9 b	0.84	0.57 c
175	163	15.3 ab	12.3 b	0.78	0.73 abc
300	270	18.7 a	16.0 a	1.03	0.97 a
425	377	17.6 a	14.2 ab	1.05	0.93 a
Pr > F		0.009	0.004	0.47	0.05

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

Cuadro 4. Lecturas SPAD de maíz forrajero en respuesta a dosis de nitrógeno (N).

Dosis de N		Días después de la siembra / año							
		21	17	40	33	57	53	73	67
2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
-- kg ha ⁻¹ --		Lecturas SPAD							
0	0	33.53 b [†]	32.25 b	30.10 b	37.25	27.18 c	27.95	27.60	23.60 b
50	57	35.10 b	34.70 ab	36.93 a	37.30	34.50 b	28.43	33.33	28.98 a
175	163	37.38 ab	35.45 a	39.95 a	39.20	37.05 ab	30.50	39.90	28.83 a
300	270	41.05 a	37.15 a	40.50 a	42.35	41.50 a	34.05	44.03	33.70 a
425	377	36.65 ab	37.68 a	40.48 a	40.28	41.18 a	31.15	42.80	29.60 a
Pr > F		0.033	0.0154	0.002	0.0838	0.0001	0.1285	0.0571	0.0088

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

que el contenido de N en planta no predijo adecuadamente el rendimiento de MS en maíz para ensilaje.

Los valores SPAD se anotan en el Cuadro 4. En tres fechas de 2007 y dos fechas de 2008 las diferencias fueron significativas estadísticamente. Como tendencia general se aprecia que las lecturas SPAD aumentan al incrementar la dosis de N. En todas las fechas de muestreo, excepto a los 17 DDS en 2008, los valores más altos se observaron en los tratamientos estimados para alcanzar la meta de rendimiento, 300 kg ha⁻¹ en 2007 y 270 kg ha⁻¹ en 2008. En términos absolutos, el valor SPAD más alto se obtuvo en el último muestreo del 2007, 44.03. Piekielek y Fox (1992) registraron valores SPAD entre 29 y 57 en la etapa de quinta hoja, en tres años de estudio, estimándose un valor crítico de 43.4 para separar predios con y sin respuesta a la aplicación N. Por su parte Zebarth *et al.* (2002) obtuvieron un valor SPAD crítico de 43.7 en la etapa de sexta hoja para identificar predios con y sin respuesta a la aplicación N.

Al graficar el RR (i. e., el rendimiento de cada tratamiento dividido entre el rendimiento del tratamiento más alto), la respuesta a N_{f+s} se ajustó a una ecuación cuadrática (Figura 1). Esta respuesta coincide con Miguez y Bollero (2006), quienes encontraron una función cuadrática para explicar la relación entre dosis de N y el rendimiento de grano en maíz.

Con la ecuación de la Figura 1 se puede calcular que el N requerido (N_{f+s}) para alcanzar el 95% del RR máximo es 325 kg ha⁻¹. Este requerimiento puede parecer elevado porque incluye pérdidas por eficiencia de uso del fertilizante; además, puede variar de una región a otra. Zebarth *et al.* (2002) encontraron que a un valor de 229 kg ha⁻¹ de N se obtuvieron las máximas lecturas SPAD, mientras que Varvel *et al.* (2007) registraron

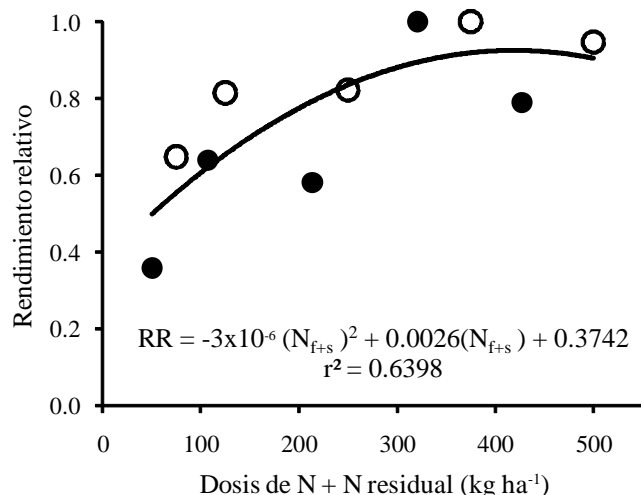


Figura 1. Rendimiento relativo (RR) de materia seca (MS) en maíz forrajero en respuesta a la dosis de nitrógeno + nitrógeno residual del suelo (N_{f+s}). Los círculos abiertos son datos de 2007 y los círculos rellenos son datos de 2008.

el rendimiento relativo máximo a una dosis de N de 179 kg ha⁻¹.

El RR también se relacionó con el ISN mediante ecuaciones cuadráticas (Cuadro 5, Figura 2). Los valores menores de r^2 se observaron en los dos primeros muestreos, antes del primero y segundo riego de auxilio. Lo anterior coincide con Sainz-Rozas y Echeverría (1998), quienes obtuvieron valores de $r^2 = 0.40$ y 0.81 en dos años consecutivos, al relacionar las lecturas

Cuadro 5. Ecuaciones de regresión cuadrática entre el índice de suficiencia de N (ISN) y el rendimiento relativo (RR) de maíz forrajero.

Días después de la siembra	Ecuación	r^2
2007		
21	$RR = -9.0042(ISN)^2 + 18.116(ISN) - 8.1215$	0.8141
40	$RR = 2.9811(ISN)^2 - 4.0756(ISN) + 2.0317$	0.8307
57	$RR = 0.9605(ISN)^2 - 0.6498(ISN) + 0.6643$	0.9669
73	$RR = 0.3455(ISN)^2 + 0.2573(ISN) + 0.3685$	0.8926
2008		
17	$RR = -0.9617(ISN)^2 + 5.5263(ISN) - 3.6711$	0.8014
33	$RR = 15.206(ISN)^2 - 24.274(ISN) + 10.077$	0.8067
53	$RR = 0.566(ISN)^2 + 1.9883(ISN) - 1.5555$	0.8150
67	$RR = 1.8772(ISN)^2 - 1.0056(ISN) + 0.1365$	0.9433

SPAD y el RR a los 32 DDS. En estas primeras etapas es cuando se requiere un método confiable para estimar la suficiencia de N en el cultivo, ya que antes del primer riego es cuando comúnmente se cultiva y se fertiliza el maíz forrajero.

Las ecuaciones de regresión cuadrática entre la dosis de N y el ISN en diferentes fechas de muestreo se anotan en el Cuadro 6 y se ilustran en la Figura 3. En 2007 los valores de r^2 fueron menores en las dos primeras fechas de muestreo, $r^2 = 0.84$ y 0.89 , respectivamente, mientras que en 2008 el mayor valor de $r^2 = 0.95$

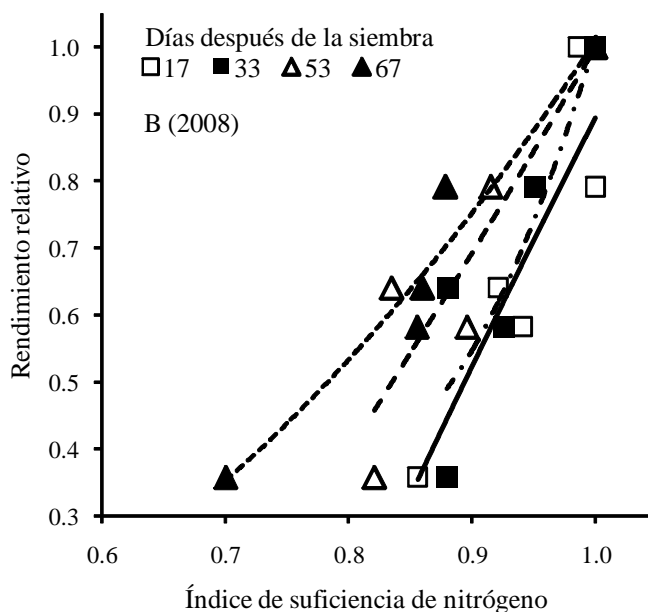
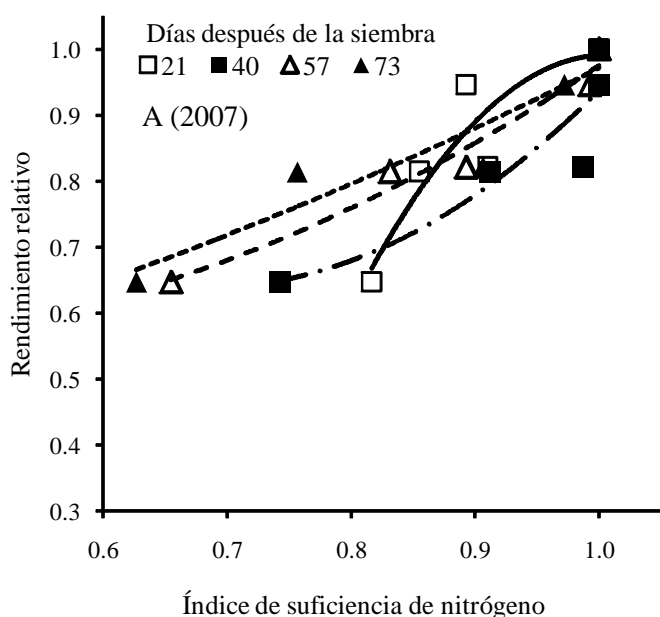


Figura 2. Rendimiento relativo de materia seca en maíz forrajero, en función del índice de suficiencia de nitrógeno en 2007 (A) y 2008 (B).

Cuadro 6. Ecuaciones de regresión cuadrática entre la dosis de nitrógeno + nitrógeno residual (N_{f+s}) y el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) en maíz forrajero.

Días después de la siembra	Ecuación	r^2
2007		
21	$ISN = -2 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0015(N_{f+s}) + 0.7057$	0.8389
40	$ISN = -3 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.002(N_{f+s}) + 0.6456$	0.8864
57	$ISN = -2 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0021(N_{f+s}) + 0.5454$	0.9292
73	$ISN = -3 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0027(N_{f+s}) + 0.457$	0.9937
2008		
17	$ISN = -8 \times 10^{-7}(N_{f+s})^2 + 0.0007(N_{f+s}) + 0.8319$	0.9516
33	$ISN = -1 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0008(N_{f+s}) + 0.8277$	0.7855
53	$ISN = -2 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0013(N_{f+s}) + 0.7418$	0.7841
67	$ISN = -4 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0022(N_{f+s}) + 0.616$	0.7818

se observó en la primera fecha de muestreo. La inconsistencia entre los resultados obtenidos con SPAD han sido señalados por Sainz-Rozas y Echeverría (1998) y por Zebarth *et al.* (2002). Los valores de r^2 obtenidos en el presente estudio son mayores a los reportados por Varvel *et al.* (2007), quienes obtuvieron una $r^2 = 0.70$ entre estas mismas variables, al combinar datos de diferentes etapas de muestreo y años de estudio.

Con las ecuaciones preliminares anotadas en el Cuadro 6 y conociendo el N requerido para alcanzar una meta de rendimiento (Figura 1), se puede calibrar

y validar el uso del SPAD en parcelas a escala comercial. Al combinar los datos de ISN de 2007 y 2008 en la primera fecha de muestreo, antes del primer riego de auxilio, la ecuación resultante fue:

$$ISN = -2 \times 10^{-6}(N_{f+s})^2 + 0.0012(N_{f+s}) + 0.77 \quad (r^2 = 0.692)$$

El método asume que el $ISN = 1.0$ corresponde a la dosis de N para obtener la meta de rendimiento (325 kg ha⁻¹ en el presente estudio); para estimar el ISN dentro del predio que se quiere fertilizar, se requiere establecer una franja fertilizada de tal manera que el N no sea limitante para la producción. Previo a la fertilización al primer cultivo, se toma la lectura SPAD en la franja no limitada de N y en el resto del predio a fertilizar. Como se explicó anteriormente, el ISN es el resultado de dividir el valor SPAD en el predio a fertilizar entre el valor SPAD en la franja no limitada de N. Por ejemplo, si la lectura SPAD en la franja no limitada de N es de 46.0 y en la parte a fertilizar es de 42.0, el $ISN = 0.91$. Al resolver la ecuación con $ISN = 0.91$, la dosis de $N_{f+s} = 160$ kg ha⁻¹. El valor anterior es la cantidad teórica presente en el suelo al momento de la medición; la dosis de N como fertilización complementaria será la diferencia entre el valor medido (160 kg ha⁻¹) y la cantidad de N para obtener el 95% del RR máximo: $325 - 160 = 165$ kg ha⁻¹ (Varvel *et al.*, (2007). El valor de 325 kg ha⁻¹ para obtener el 95 del RR máximo de maíz forrajero aplica sólo a las condiciones de suelo en que se llevó a cabo

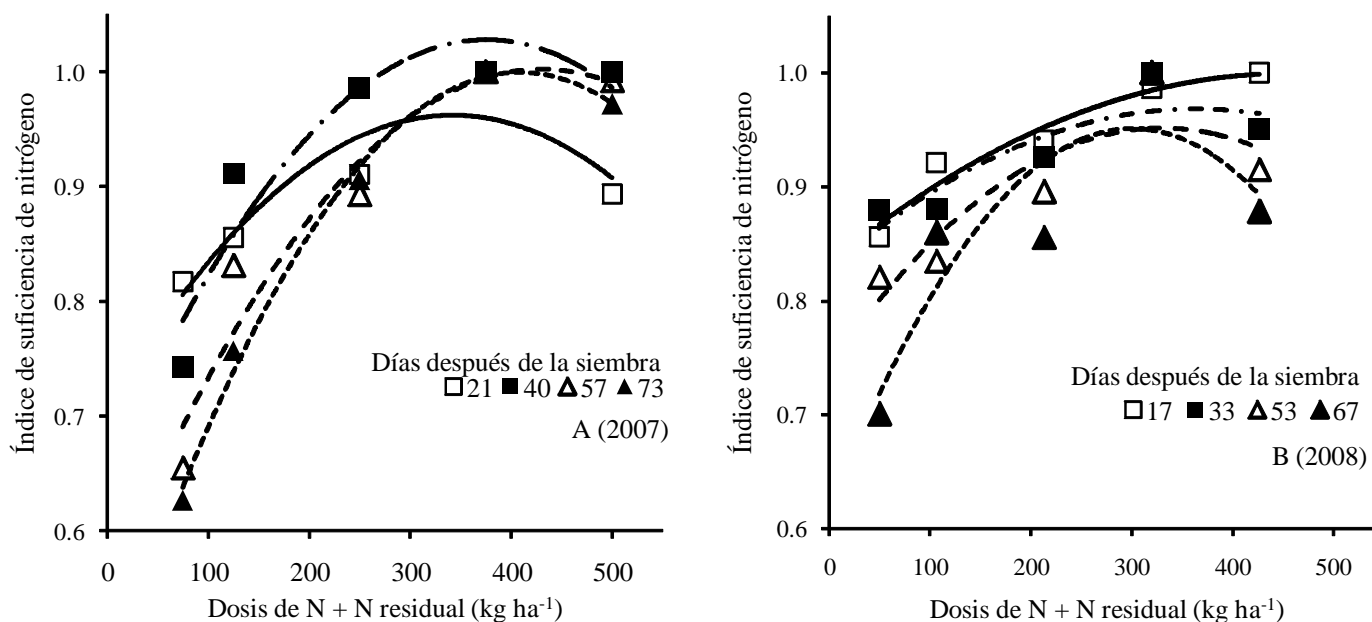


Figura 3. Índice de suficiencia de nitrógeno (N) en maíz forrajero, en función de la dosis de N + N residual en 2007 (A) y 2008 (B).

el estudio. Las ecuaciones generadas en el presente estudio son preliminares. Para fines de recomendación se requiere un número mayor de datos.

CONCLUSIONES

- La respuesta en rendimiento de maíz forrajero a dosis crecientes de nitrógeno (N) se ajustó a una ecuación cuadrática, ya que la producción de forraje disminuyó en el tratamiento diseñado para aportar el 133% del requerimiento de N para obtener la meta de rendimiento. De acuerdo con la ecuación obtenida, el requerimiento de N (N_{f+s}) para alcanzar el 95% del rendimiento relativo máximo fue de 325 kg ha⁻¹.

- Las lecturas SPAD estuvieron relacionadas con los rendimientos obtenidos. Se utilizó el índice de suficiencia de N para relacionar las lecturas SPAD con la dosis de N. Los valores de r² variaron de 0.78 a 0.99, sin embargo, al combinar los datos de ISN de la primera fecha de muestreo en ambos años de estudio, la r² fue de 0.692, con una ecuación: $ISN = -2 \times 10^{-6} (N_{f+s})^2 + 0.0012 (N_{f+s}) + 0.77$. Se requiere un número mayor de datos para calibrar y validar la presente metodología de uso del SPAD con fines de recomendación a escala comercial en maíz forrajero.

LITERATURA CITADA

- Castellanos R., J. Z., J. J. Márquez-Ortiz, J. D. Etchevers B., A. Aguilar-Santelises y J. R. Salinas. 1996. Efecto de largo plazo de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre el rendimiento de forrajes y las propiedades del suelo en una región árida irrigada del Norte de México. *Terra* 14: 150-158.
- Faz-Contreras, R., U. Figueroa-Viramontes, R. Jasso-Ibarra y L. H. Maciel-Pérez. 2006. Fertilización y riego. pp. 141-173. *In*: Maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Libro Científico No. 3. INIFAP, Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coah. México.
- Hoel, B. and K. Asbjørn-Solhaug. 1998. Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Ann. Bot.* 82: 389-392.
- Jones, J. B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press. New York, NY, USA.
- Lauer, J. G., P. R. Carter, T. M. Wood, G. Diezel, D. W. Wiersma, R. E. Rand, and M. J. Mlynarek. 1999. Corn hybrid response to planting date in the northern corn belt. *Agron. J.* 91: 834-839.
- Miguez, F. E. and G. A. Bollero. 2006. Winter cover crops in Illinois: Evaluation of ecophysiological characteristics of corn. *Crop Sci.* 46: 1536-1545.
- Núñez-Hernández, G., R. Faz-Contreras, F. González-Castañeda y A. Peña-Ramos. 2005. Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *Téc. Pec. Méx.* 43: 69-78.
- Palma-López, D. J., S. Salgado-García, J. J. Obrador-Olán, A. Trujillo-Narcia, L. del C. Lagunes-Espinoza, J. Zavala-Cruz, A. Ruiz-Bello y M. A. Carrera-Martel. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.
- Piekielek, W. P. and R. H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict nitrogen requirements for maize. *Agron. J.* 84: 59-65.
- Randall G. W. and D. J. Mulla. 2001. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices. *J. Environ. Qual.* 30: 337-344.
- Rangel-Lucio, J. A., G. Alcántar-González, J. Z. Castellanos-Ramos, E. García-Moya, C. Trejo-López y H. Vaquera-Huerta. 2002. Comparación de dos pruebas para diagnosticar nitrógeno en sorgo. *Terra* 20: 383-390.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009. Delegación Comarca Lagunera. <http://www.sagarpa.gob.mx/dlg/laguna/informacion.htm>. (Consulta: marzo 1, 2009).
- Sainz-Rozas, H. y H. E. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 103: 37-44.
- SAS Institute. 2003. SAS/STAT user's guide. Release 9.1 SAS Institute. Cary, NC, USA.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. México, D. F.
- Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agron. J.* 100: 571-579.
- Varvel, G. E., W. W. Wilhelm, J. F. Shanahan, and J. S. Schepers. 2007. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agron. J.* 99: 701-706.
- Zebarth, B. J., M. Younie, J. W. Paul, and S. Bittman. 2002. Evaluation of leaf chlorophyll index for making fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 665-684.