

APORTE DE NITRÓGENO POR EL SUELO Y EFICIENCIA DE APROVECHAMIENTO DEL NITRÓGENO APLICADO EN MAÍZ DE TEMPORAL

CONTRIBUTION OF NITROGEN BY THE SOIL AND EFFICIENCY OF USE OF NITROGEN APPLIED IN RAINFED MAIZE

Marco A. Sánchez-de Jesús^{1*}, Víctor H. Volke-Haller¹, José I. Cortés-Flores¹, Andrés María-Ramírez² y César San-Martín-Hernández¹

¹Colegio de Postgraduados, Posgrado en Edafología, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ²Colegio de Tlaxcala A. C., San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala, México.

*Autor de correspondencia (comar.tony@gmail.com)

RESUMEN

Las variaciones de la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante nitrogenado en maíz y la pérdida de nitrógeno (N) al medio ambiente son de gran relevancia en la producción agrícola. El objetivo de esta investigación fue estimar el aporte de N por el suelo y la eficiencia de recuperación del N aplicado en maíz de temporal en suelos de diferente contenido de materia orgánica. Se establecieron dos experimentos en Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala (sitios T1 y T2) y uno en Montecillo, Estado de México (sitio M). Los tratamientos fueron: 0, 90 y 120 kg N ha⁻¹ en el sitio T1 y 0, 70 y 100 kg N ha⁻¹ en los sitios T2 y M. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones en Tetla y tres repeticiones en Montecillo. El análisis de la información fue mediante regresión. El contenido de materia orgánica del suelo fue 1.1, 1.2 y 3.3 %, y de N-NO₃ en la siembra de 36, 31 y 72 mg kg⁻¹ en los sitios T1, T2 y M, respectivamente. El aporte de N por suelo franco arenoso fue 117 kg N ha⁻¹ en el sitio T1, 67 kg N ha⁻¹ en el sitio T2 y de 80 kg N ha⁻¹ en el sitio M de suelo franco arcilloso. Las eficiencias de aprovechamiento de N aplicado fueron de 32 a 37 % en el sitio T1, de 4 a 7 % en el sitio T2 y de 0 % en el sitio M. La causa de estas bajas eficiencias se asoció con alta concentración de N-NO₃ en los tres sitios, los bajos rendimientos por la siembra tardía en los sitios T2 y M, escasa precipitación en el sitio T2, deficiencia de micronutrientes e infestación de gallina ciega (*Phyllophaga* spp.) en el sitio M.

Palabras clave: *Zea mays* L., materia orgánica, N inorgánico, rendimiento de grano de maíz, textura del suelo.

SUMMARY

Variations in the efficiency of use of nitrogen fertilizer in maize and the loss of nitrogen (N) to the environment are of great relevance in agricultural production. The objective of this research was to estimate the contribution of N by the soil and the efficiency of recovery of N applied in rainfed maize in soils with different organic matter content. Two experiments were carried out in Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala (sites T1 and T2) and one in Montecillo, State of Mexico (site M). Treatments were: 0, 90 and 120 kg N ha⁻¹ at site T1 and 0, 70 and 100 kg N ha⁻¹ at sites T2 and M. The experimental design was randomized complete blocks with four replications in Tetla and three replications in Montecillo. Data analysis was by regression. The organic matter content of the soil was 1.1, 1.2 and 3.3 %, and NO₃-N at sowing was 36, 31 and 72 mg kg⁻¹ at sites T1, T2 and M, respectively. The contribution of N by sandy loam soil was 117 kg N ha⁻¹ at site T1, 67 kg N ha⁻¹ at site T2 and 80 kg N ha⁻¹ at site M of clay loam soil. Efficiencies of use of the applied N were 32 to 37 % at site T1, 4 to 7 % at site T2 and 0 % at site M. The reason

of these low efficiencies was associated with high concentration of NO₃-N at the three sites, low yields due to late planting date at sites T2 and M, low precipitation at site T2, micronutrient deficiency and grub worm (*Phyllophaga* spp.) infestation at site M.

Index words: *Zea mays* L., corn grain yield, inorganic N, organic matter, soil texture.

INTRODUCCIÓN

Nitrógeno (N) es el nutriente que las plantas requieren en mayor cantidad, y una de las fuentes que proporciona este elemento es la materia orgánica del suelo (Farzadfar *et al.*, 2021); sin embargo, los suelos no tienen la capacidad suficiente para satisfacer los requerimientos de N de los cultivos, por lo que es necesario aplicarlo como fertilizante (Castellanos *et al.*, 2019).

La eficiencia de aprovechamiento del N aplicado en los cultivos suele ser baja (< 50 %), en maíz los valores van de 35 a 75 % (Morris *et al.*, 2018). Cuando este nutriente se desaprovecha, se pierde por lixiviación (nitrato), volatilización (amoníaco), desnitrificación (N₂O y NO₂) y por escorrentía superficial (Goodkind *et al.*, 2023). La eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado aplicado depende de factores como el suelo (principalmente textura), precipitación (cantidad y distribución), régimen hídrico (temporal o riego), manejo de la fertilización (cantidad, fuente, oportunidad y forma de aplicación), cultivo (densidad y profundidad del sistema radical) y su manejo (Govindasamy *et al.*, 2023).

En las últimas décadas se ha observado en los cultivos un aumento proporcional de los rendimientos conforme se incrementan los niveles de fertilización (Kopittke *et al.*, 2019); sin embargo, en el caso de la fertilización nitrogenada, se ha comprobado que el incremento de las dosis de N origina una disminución de la eficiencia

de aprovechamiento del N aplicado (Lu *et al.*, 2019) y, por tanto, implica mayores pérdidas, contaminación ambiental (He *et al.*, 2022) y costos de producción más altos por el fertilizante aplicado (Cassim *et al.*, 2022). El objetivo de esta investigación fue determinar el aporte de N por el suelo y la eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno aplicado en maíz de temporal, en suelos de diferente contenido de materia orgánica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y clima de los sitios experimentales

Se condujeron dos experimentos en la zona de Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala, y uno en la zona de Montecillo, Estado de México. Las coordenadas geográficas y las condiciones climáticas de los sitios experimentales se muestran en el Cuadro 1. De igual modo, la distribución de lluvia y la temperatura media registrados en los sitios experimentales se presentan en las Figuras 1 y 2.

Material genético

El material genético empleado en el sitio T1 fue maíz nativo de grano color morado y en el sitio T2 maíz de grano multicolor (rojo, amarillo, morado y blanco), pertenecientes al productor de Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala. En el sitio Montecillo (M) se usó el híbrido Promesa del Colegio de Postgraduados.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos de N se definieron con base en la recomendación regional y fueron complementados con fertilización fosfórica y potásica. Las dosis evaluadas fueron 0-0-0, 90-40-40 y 120-40-40 kg ha⁻¹ en el sitio T1 y 0-0-0, 70-40-40 y 100-40-40 kg ha⁻¹ en los sitios T2 y M (María *et al.*, 2003; Zamudio *et al.*, 2017). El N se aplicó como sulfato de amonio (20.5 % N); el fósforo como fosfato diamónico (18 % N + 46 % P₂O₅) en el sitio T1 y como superfosfato de calcio triple (46 % P₂O₅) en los sitios

T2 y M; el potasio se aplicó como cloruro de potasio (60 % K₂O). Los tratamientos de fertilización se aplicaron en su totalidad a los 21 días después de la siembra (dds) en el sitio T1, 22 dds, en el sitio T2 y 39 dds en el sitio M, distribuido en banda al fondo del surco. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones en los sitios T1 y T2 y tres repeticiones en el sitio M. La unidad experimental consistió de cuatro surcos de 10 × 0.85 m. La parcela útil consideró los dos surcos centrales en cada repetición.

Establecimiento de los experimentos

La fecha de siembra de los experimentos estuvo supeditada al inicio de temporal: en el sitio T1 ésta fue el 9 de mayo, en el sitio T2 el 9 de junio, y en el sitio M el 22 de junio de 2022 (Figuras 1 y 2). En los sitios T1 y T2, la siembra fue mecanizada (sembradora) a una distancia de 22 cm entre plantas y 85 cm entre surcos, y manual en el sitio M con distancias de 85 cm entre surcos y 50 cm entre matas, depositando dos y tres semillas por mata. El control de malezas fue manual en los sitios T2 y M; mientras que, en el sitio T1 se realizó aplicación de Gesaprim (i.e., Atrazina 455, 2.5 L ha⁻¹) en pre-emergencia y Focus (i.e., Carfentrazone etil + 2,4-D, 1 L ha⁻¹) en post-emergencia. En el sitio M hubo presencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), que se controló con Spinoteram (100 mL ha⁻¹) y tres aplicaciones vía drench de Diazinon (1.5 L ha⁻¹) contra gallina ciega (*Phyllophaga* spp.).

Análisis de suelo

El muestreo de suelo fue sistemático en rejilla a una profundidad de 20 cm (Etchevers-Barra y Padilla-Cuevas, 2016), considerando una muestra compuesta de seis submuestras en cada bloque experimental (102 m²). Los parámetros analizados fueron: pH en agua, relación 1:2 (p/v); conductividad eléctrica (CE) en suspensión 1:5 (p/v); materia orgánica por Walkley y Black; fósforo Olsen; K, Ca, Mg y Na intercambiables, utilizando acetato de amonio 1N pH 7; textura por Bouyoucos; micronutrientes (Fe, Cu, Mn y Zn) extraídos con DTPA pH 7.30; y nitrógeno

Cuadro 1. Ubicación y condiciones climáticas de los experimentos de maíz de temporal, durante el ciclo P-V 2022 en Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala, y Montecillo, Estado de México.

Sitio	Estado	Coordenadas	Clima [†]	Tm (°C)	PP (mm)
Tetla (T1)	Tlaxcala	19° 26' 4.27" N, 98° 7' 49.09" O	Cb (w ₂) (w) (i) g	16.1	668
Tetla (T2)	Tlaxcala	19° 26' 11.78" N, 98° 8' 29.56" O	Cb (w ₂) (w) (i) g	16.1	668
Montecillo (M)	Estado de México	19° 28' 1" N y 98° 54' 24" O	Cb (w ₀) (w) (i) g	16.6	620

[†]García (2004). Tm: temperatura media anual, PP: precipitación media anual.

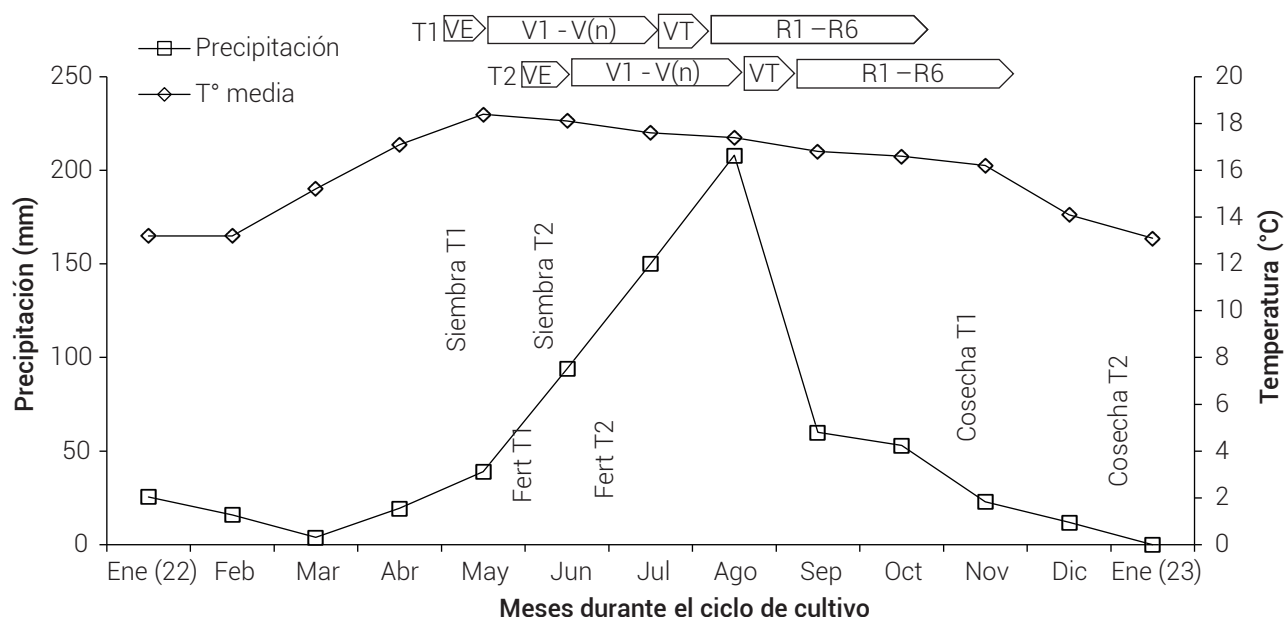


Figura 1. Precipitación y temperatura media (T° med) mensuales durante el ciclo del cultivo en los sitios experimentales de Tetla 1 (T1) y Tetla 2 (T2), Tlaxcala de enero 2022 a enero 2023. VE: etapa de emergencia, V1-V(n): etapa vegetativa desde la primera hasta *n* hojas liguladas, VT: espiga totalmente abierta, R1-R6: desarrollo completo del grano hasta madurez fisiológica, Fert: fertilización única en la primera labor.

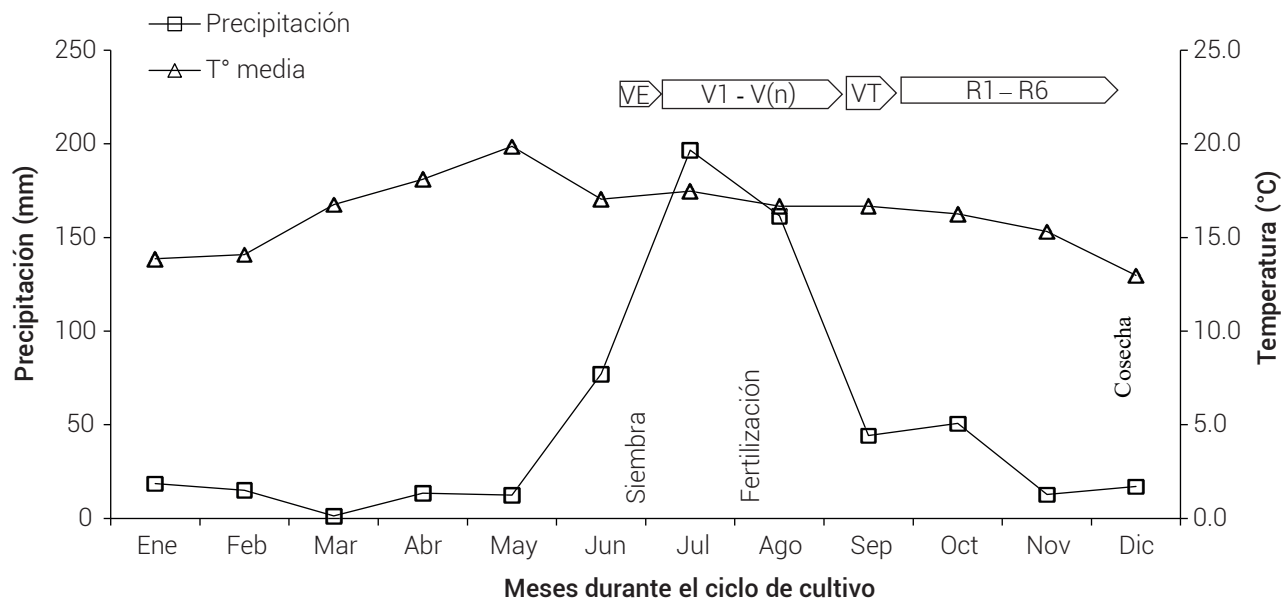


Figura 2. Precipitación y temperatura media (T° med) mensuales registradas durante el ciclo del cultivo en el sitio experimental Montecillo (M), Estado de México en 2022. VE: etapa de emergencia, V1-V(n): etapa vegetativa desde la primera hasta *n* hojas liguladas, VT: espiga totalmente abierta, R1-R6: desarrollo completo del grano hasta madurez fisiológica.

inorgánico, utilizando KCl 2N (Etchevers-Barra, 1992). Los resultados del análisis de suelo de cada sitio experimental se muestran en los Cuadros 2 y 3.

Análisis de planta

El muestreo para análisis de planta (rastrajo) y grano fue en madurez fisiológica. Este consistió en tomar dos plantas completas (sin raíz) en competencia homogénea de cada surco central. Para grano, se eligieron ocho mazorcas de tamaño promedio de las mazorcas cosechadas. El grano y la planta fueron cortados en trozos pequeños, se colocaron en bolsas de papel de estraza y fueron secados por aire forzado a 70 °C en horno (Heraeus, Hanau, Alemania) hasta obtener peso seco constante. Las muestras se molieron en molino de canicas (Spex Mixer-Mill 8000, Metuchen, New Jersey, USA) con malla No. 30 (0.59 mm). Se analizó nitrógeno total en grano (Ng) y rastrajo (Nr) por el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965).

Variables de estudio

Las variables medidas fueron: rendimiento de grano al 14 % de humedad (Mg ha⁻¹) (González-Mateos *et al.*, 2018) corregido por el grano dañado (Aguilar-Ávila y Ávalos-Gutiérrez, 2013), rendimiento de rastrajo seco (Mg ha⁻¹) y densidad de población observada (D) (CIMMYT, 2012), concentración de nitrógeno en grano (Ng) y rastrajo (Nr); y con base en el rendimiento y los valores de Ng y

Nr, la extracción de N por grano (Eg) y rastrajo (Er) (kg N ha⁻¹). El aporte de N por la materia orgánica del suelo se consideró como la extracción total (Eg + Er) realizada por el tratamiento sin N aplicado (Meisinger *et al.*, 2008). Para expresar el N aportado por cada punto porcentual de materia orgánica del suelo, la extracción total de N se dividió entre el porcentaje de MO observado en cada sitio experimental. La eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno (EAN) se determinó por diferencia (Sánchez, 2021):

$$EAN = \frac{E(N) - E(T_0)}{N_a} \times 100$$

Donde E (N): cantidad de N total extraído por la planta (rastrajo + grano) del tratamiento con N aplicado (kg ha⁻¹), E (T₀): cantidad de N absorbido por la planta (rastrajo + grano) del tratamiento sin N aplicado (kg ha⁻¹) y N_a: nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹).

Análisis estadístico

La información se analizó por regresión con el programa SAS Ver. 9.4 (Statistical Analysis System, SAS Institute Inc.), a fin de estimar ecuaciones para las variables de estudio en función del N aplicado, y adicionalmente densidad de población y las variables auxiliares (de las repeticiones) si se observase variación en ellas. El procedimiento seguido fue el propuesto por Volke-Haller (2008), enfocado a obtener un modelo con menor cuadrado medio del error.

Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del suelo de los sitios experimentales de Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala, y Montecillo, Estado de México.

Sitio	pH	CE	MO	N-NO ₃	N-NH ₄	P _{Olsen}	K	Ca	Mg	Na
		(dS m ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹ suelo)				(cmol _c kg ⁻¹ suelo)		
Tetla 1	6.1	0.13	1.1	36	18	34.1	0.6	3.7	1.6	0.1
Tetla 2	5.5	0.08	1.2	31	19	8.6	0.2	1.9	0.8	0.1
Montecillo	8.3	0.37	3.3	72	16	16.2	6.3	50.3	11.0	1.6

CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica del suelo, N-NO₃: nitrógeno nítrico, N-NH₄: nitrógeno amoniacal, P_{Olsen}: fósforo Olsen, Bases: potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables.

Cuadro 3. Micronutrientes y textura del suelo en los sitios experimentales Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala y en Montecillo, Estado de México.

Sitio	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Textura
	(mg kg ⁻¹ suelo)				
Tetla 1	40.2	0.9	1.9	34.1	Franco arenosa
Tetla 2	53.9	0.6	0.5	31.9	Franco arenosa
Montecillo	3.7	0.4	0.5	6.1	Franco arcillosa

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones de regresión para rendimiento de grano y rastrojo

Las ecuaciones de regresión para rendimiento de grano y rastrojo de maíz en los sitios experimentales se presentan en el Cuadro 4. Si hubo variación en la densidad de población final, ésta se incluyó en la ecuación de regresión del rendimiento de grano y rastrojo.

En relación al coeficiente de determinación (R^2), sobresale el caso del rendimiento de grano en el sitio M, donde el modelo de regresión explica gran parte de las variaciones en la variable respuesta y esto puede tener su explicación en el mayor control que se tuvo sobre el experimento en campo, mientras que en el rendimiento de grano del sitio T1 se obtuvo un menor R^2 asociado a un mayor error experimental ocasionado por factores no controlables (ambiente).

Rendimiento de grano

En el sitio T1 el rendimiento de grano aumentó de 4.2 Mg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹ a 4.9 Mg ha⁻¹ (16.6 %) con 120 kg N ha⁻¹, y la densidad de población observada (D) aumentó el rendimiento de 4.2 a 5.2 Mg ha⁻¹ (23.8 %) en un rango de variación de 44,100 a 60,000 plantas ha⁻¹ (Cuadro 4). El escaso efecto del N aplicado, en un suelo con 1.1 % de MO se puede relacionar con una elevada concentración de N-NO₃ del suelo en la siembra (36 mg kg⁻¹) (Binford *et al.*, 1992). En seis genotipos mejorados de maíz se ha observado que el rendimiento de grano aumenta de 4.2 a 6.1 Mg ha⁻¹ al pasar de 50,000 a 83,000 plantas ha⁻¹, respectivamente (Sánchez-Hernández *et al.*, 2019). En maíz de temporal, la sequía limita el aumento

del rendimiento cuando la densidad de población se eleva de 65,000 a 75,000 y 90,000 plantas ha⁻¹ (Ramírez-Díaz *et al.*, 2021).

En el sitio T2, el rendimiento de grano aumentó de 2.26 Mg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹ a 2.50 Mg ha⁻¹ (10.6 %) con 100 kg N ha⁻¹ (Cuadro 4). El escaso efecto del N aplicado se relaciona con la baja precipitación durante el periodo crítico del maíz (prefloración hasta llenado de grano), que limita el rendimiento de grano (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022), además de la concentración alta de N-NO₃ (31 mg kg⁻¹) del suelo en la siembra (Binford *et al.*, 1992).

En el sitio M, el rendimiento de grano tuvo un incremento de 2.4 Mg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹ a 2.7 Mg ha⁻¹ (12.5 %) con 100 kg N ha⁻¹ (Cuadro 4). Altas concentraciones de N-NO₃ del suelo (72 mg kg⁻¹) en la siembra (Cuadro 2) conllevan a nula respuesta en el rendimiento de grano según la literatura (Raza y Farmaha, 2022), como se observó en esta investigación con 70 kg N ha⁻¹; así mismo, suelos con porcentaje de MO mayor de 3.4 % nulifican la respuesta del cultivo al N aplicado (Zingore y Njoroge, 2022); además, los bajos contenidos de micronutrientes en el suelo también limitan el rendimiento de los tratamientos con y sin N (Kihara *et al.*, 2016), tal como se observó en los niveles de Fe, Cu y Mn en este sitio experimental (Cuadro 3).

Rendimiento de rastrojo

En el sitio T1, el rendimiento de rastrojo disminuyó de 7.2 Mg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹ a 6.7 Mg ha⁻¹ (6.9 %) con 120 kg N ha⁻¹. Por su parte, la densidad de población incrementó el rendimiento de 7.2 a 10.1 Mg ha⁻¹ (40.3 %) para un incremento de 44,100 a 60,000 plantas ha⁻¹ (Cuadro 4). La fertilización nitrogenada (0 a 280 kg N ha⁻¹) no incrementó el rendimiento de biomasa de maíz en el primer año de

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión para rendimiento de grano y rastrojo de maíz de los experimentos de Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala y Montecillo, Estado de México.

Exp	Ecuación de regresión	Pr. F	CV	R ²
T1	Yg = 4.243 + 0.00536 N + 0.0000632 (D - 44100) [†]	0.0592	14.22	0.466
	Yr = 7.247 - 0.00472 N + 0.000179 (D - 44100)	0.0018	10.79	0.755
T2	Yg = 2.258 + 0.0000246 N ²	0.0475	7.92	0.706
	Yr = 3.487 + 0.0271 N - 0.000242 N ² + 0.0000961 (D - 36200)	0.0934	11.41	0.531
M	Yg = 2.432 - 0.0314 N + 0.000339 N ²	0.0589	12.80	0.915
	Yr = 3.694 - 0.00239 N + 0.00921 (D - 36500) ^{0.5}	0.2733	13.00	0.351

Exp: experimento, Yg: rendimiento de grano (Mg ha⁻¹) al 14 % de humedad, Yr: rendimiento seco de rastrojo (Mg ha⁻¹), N: nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹), D: densidad de población (plantas ha⁻¹), Pr. F: probabilidad de F, CV: coeficiente de variación (%), R²: coeficiente de determinación. [†]A las densidades de población se les restó el menor valor observado.

evaluación en Taojia, China (Qiu *et al.*, 2015); en cambio, la densidad de población incrementó el rendimiento de rastrojo en etapa fenológica R3, de 4.0 a 6.6 Mg ha⁻¹ al aumentar de 25,000 a 81,250 plantas ha⁻¹, respectivamente (Duarte y Duarte, 2023).

En el sitio T2, el rendimiento de rastrojo aumentó de 3.49 Mg ha⁻¹ para 0 kg N ha⁻¹ a 4.24 Mg ha⁻¹ (21.5 %) con 55 kg N ha⁻¹ y disminuyó a 3.77 Mg ha⁻¹ con 100 kg N ha⁻¹. Así también, la densidad de población aumentó el rendimiento de 3.5 a 4.5 Mg ha⁻¹ (28.5 %) en un cambio de 36,200 a 46,800 plantas ha⁻¹ (Cuadro 4). Se ha observado que cuando la concentración de N-NO₃ en suelo es alta (31 mg kg⁻¹), la respuesta productiva por altas dosis de fertilización nitrogenada se reduce (Binford *et al.*, 1992). Las densidades de población de 55,555 y 85,470 plantas ha⁻¹ incrementaron el rendimiento de rastrojo de 3.3 a 4.4 Mg ha⁻¹, respectivamente (Dhital *et al.*, 2022).

En el sitio Montecillo, el N aplicado no presentó efecto sobre el rendimiento de rastrojo, mientras que la densidad de población incrementó el rendimiento de 3.7 Mg ha⁻¹ con 36,500 plantas ha⁻¹ a 4.7 Mg ha⁻¹ (27 %) con 47,600 plantas ha⁻¹ (Cuadro 4). En un suelo con 3.3 % de MO la respuesta en el rendimiento del rastrojo se reduce por la fertilización nitrogenada (Halvorson *et al.*, 2005); esto sugiere que la reserva de N inicial en el suelo proporcionó un buen suministro de N al cultivo y por ello, la respuesta del rendimiento de rastrojo al N aplicado fue negativa (Zingore y Njoroge, 2022). Por otra parte, los híbridos se caracterizan por su capacidad de producir follaje y, dado que el sistema de siembra fue por mata, se genera mayor competencia interespecífica y, por tanto, el rendimiento de rastrojo disminuye (Quiroz *et al.*, 2017).

Aporte de N por el suelo y eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno

El aporte de nitrógeno se relaciona directamente con la materia orgánica y suelo de textura gruesa, pero es inversamente proporcional a las texturas finas; entonces, al aumentar el contenido de la materia orgánica se elevaría el nivel de nitrógeno del suelo, pero por las diferencias texturales, en el sitio T1 (franco arenoso), T2 (franco arenoso) y M (franco arcilloso), los valores observados del aporte de nitrógeno fueron 117.0, 67.8 y 76.9 kg N ha⁻¹ (Cuadro 5). La literatura indica aportes variables de N por el suelo derivado de la MO, valores medios de 30 kg N ha⁻¹ con 1 % de MO, pero en suelos de texturas gruesas éstos varían entre 30 y 40 kg N ha⁻¹ y en suelos de texturas finas de 20 a 30 kg N ha⁻¹ (Castellanos *et al.*, 2000). En el sitio M, de textura franco arcillosa, el aporte de N concuerda con lo reportado por Castellanos *et al.* (2000) para suelos de textura fina. En los sitios T1 y T2,

con suelos de textura gruesa, el aporte de N es superior a la señalada por Castellanos *et al.* (2000), especialmente en el sitio T1. Dado que en el sitio T2 la siembra fue tardía, esta condición expuso al cultivo a una menor precipitación (estrés hídrico), entonces la menor productividad implicó una extracción menor del nutriente y, por lo tanto, menor aporte de nitrógeno del esperado.

En el sitio T1, la concentración de N en grano no fue afectada por el N aplicado, ésta varió entre 1.32 y 1.35 % N; en cambio, su concentración en el rastrojo aumentó de 0.57 % N para el tratamiento sin N a valores de 0.83 (45.6 %) y 1.00 % N (75.4 %) con 90 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente. Finalmente, la extracción total media obtenida por el grano y rastrojo fue de 117 kg N ha⁻¹ para el tratamiento sin N, lo que correspondería al aporte de N que hizo el suelo. Considerando este aporte de N por el suelo y la extracción de N por los tratamientos con 90 y 120 kg N ha⁻¹, la EAN para ambos tratamientos resultó del orden de 32.9 y 37.5 %, respectivamente (Cuadro 5). En general estas EAN resultan bajas para rendimiento, del orden de 5 Mg ha⁻¹. La causa de esta situación puede residir en la concentración alta de N-NO₃ del suelo en la siembra (36 mg kg⁻¹) (Binford *et al.*, 1992), esto aumentó el N extraído por el tratamiento sin N aplicado. En rendimientos de grano de 3.88 y 4.55 Mg ha⁻¹ obtenidos con 90 y 120 kg N ha⁻¹, la EAN fue 34.8 y 38.6 %, respectivamente (Meena *et al.*, 2020). En suelos arenosos con pH de 4.6 y contenido medio de MO (1.48 %), la EAN varió de 45 a 46 % en maíz de temporal con buena condición de humedad (Tasistro *et al.*, 2021).

En el sitio T2 con 1.2 % MO, la concentración de N en grano fue 1.36, 1.38 y 1.48 % N con 0, 70 y 100 kg N ha⁻¹, respectivamente. De manera similar, la concentración de N en el rastrojo no incrementó con aplicaciones de 0 y 100 kg N ha⁻¹, obteniéndose un valor medio de 0.87 % N (Cuadro 5); entonces, la extracción total por grano y rastrojo fue de 67.8 kg N ha⁻¹ con la dosis de 0 kg N ha⁻¹, lo que correspondería al aporte de N por el suelo, y la extracción de N por el tratamiento de 70 y 100 kg N ha⁻¹ fue de 70.9 y 75.2 kg N ha⁻¹, respectivamente. Con estos valores de extracción de N, las EAN resultaron bajas, de 4.6 y 7.5 % para ambos tratamientos de fertilización y rendimientos del orden de 2.5 Mg ha⁻¹ (Cuadro 5); las causas probables son: i) concentración alta de N-NO₃ del suelo a la siembra (31 mg kg⁻¹) (Binford *et al.*, 1992), y ii) bajo rendimiento de grano de los tratamientos con N debido a condiciones limitativas de humedad durante todo el ciclo del cultivo (precipitación mal distribuida) y fecha de siembra tardía (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022). En cinco suelos de Villaflores, Chiapas, México que contenían de 1.2 a 2.15 % de MO, para los cuales el rendimiento del tratamiento sin N fue entre 1.20 y 3.56 Mg ha⁻¹, su correspondiente extracción fue de 22 y 64 kg N ha⁻¹, y la EAN varió de 30 a

Cuadro 5. Rendimiento, concentración y extracción de nitrógeno en grano y rastrojo, extracción total de N y eficiencia de aprovechamiento del N por el maíz en los sitios experimentales de Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala y Montecillo, Estado de México.

Sitio	N _a	Yg	Yr	Ng	Nr	Eg	Er	Et	EAN (%)
		(kg ha ⁻¹)		(%)			(kg N ha ⁻¹)		
Tetla 1	120	5884.4	9514.6	1.32	1.0	66.80	95.15	161.95	37.5
	90	5723.6	9656.2	1.35	0.83	66.45	80.15	146.60	32.9
	0	5241.2	10081.0	1.32	0.57	59.50	57.46	117.0	-
Tetla 2	100	2657.0	4795.6	1.48	0.86	33.82	41.39	75.20	7.5
	70	2531.5	5216.8	1.38	0.78	30.04	40.90	70.94	4.6
	0	2411.0	4505.0	1.36	0.88	28.20	39.55	67.80	-
Montecillo	100	2682.0	4421.3	1.38	1.01	31.83	44.70	76.53	0
	70	1895.1	4493.0	1.4	1.02	22.82	45.60	68.42	0
	0	2432.0	4660.3	1.39	1.03	29.07	47.81	76.9	-

N_a: nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹), Ng: nitrógeno en grano, Nr: nitrógeno en rastrojo, Eg: extracción de nitrógeno en grano, Er: extracción de nitrógeno en rastrojo, Et: extracción total de nitrógeno (grano + rastrojo), EAN: eficiencia de aprovechamiento del N.

50 % (Tasistro y Camas-Gómez, 2016).

En el sitio M con 3.3 % MO, la concentración de N en el grano no fue afectada por el N aplicado, obteniendo un valor medio de 1.39 % N; de igual manera, la concentración de N en el rastrojo tampoco fue afectada por el N aplicado, siendo del orden 1.02 % N. Para estos valores de concentración de N, la extracción de N fue de 76.9 kg N ha⁻¹. En este caso, la extracción de N por el tratamiento con 70 y 100 kg N ha⁻¹ resultó menor que lo extraído por el tratamiento sin N, por lo cual no se obtuvo una EAN; en este sitio se obtuvieron bajos rendimientos de los tratamientos con y sin N, aun cuando el suelo tenía 3.3 % de MO y 72 mg kg⁻¹ de N-NO₃ a la siembra (Raza y Farmaha, 2022), debido a una infestación de gallina ciega (*Phyllophaga* spp.), siembra tardía que implica menor número de días para completar el ciclo (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022) y bajo contenido de micronutrientes en el suelo (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

De acuerdo con el contenido de MO y la textura del suelo, se considera que el aporte de N por el suelo por cada 1.0 % de MO fue muy alto en el sitio Tetla 1, medio-alto en el sitio Tetla 2 y medio-bajo en el sitio Montecillo. Los aportes de N por el suelo se asociaron con alta concentración de N-NO₃ del suelo a la siembra en los sitios Tetla 1, Tetla 2

y Montecillo, a la vez que las limitantes del rendimiento en los sitios Tetla 2 y Montecillo pudieron reducir el aporte de N por el suelo. La eficiencia de aprovechamiento de N fue: 1) baja, de 32 y 37 % según la dosis de N, en el sitio Tetla 1; 2) muy baja, de 4.6 y 7.5 % según la dosis de N, en el sitio Tetla 2, y 3) no se obtuvo eficiencia de aprovechamiento de N en el sitio Montecillo debido a que el tratamiento sin N extrajo mayor cantidad de N que los tratamientos con N.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca proporcionada a Marco Antonio Sánchez de Jesús para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias en Edafología. Así también, al Sr. José Luis Gutiérrez Muñoz y a la M. C. Karina Gutiérrez Hernández por permitirnos establecer los experimentos de maíz en sus parcelas y las facilidades otorgadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar-Ávila. J. y C. Ávalos-Gutiérrez (2013) Estimación de cosecha de maíz. *In*: Estimación de Rendimientos en el Sector Agropecuario. J. Aguilar A. y V. H. Santoyo C. (coords.). Universidad Autónoma Chapingo-Miguel Ángel Porrúa. México, D. F. pp:11-22.
- Binford G. D., A. M. Blackmer and M. E. Cerrato (1992) Relationships between corn yields and soil nitrate in late Spring. *Agronomy Journal* 84:53-59, <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400010012x>

- Bremner J. M. (1965) Total nitrogen. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. A. G. Norman (ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. pp:1149-1178, <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Cassim B. M. A. R., M. R. Besen, W. D. Kachinski, C. R. Macon, J. H. V. de Almeida Junior, R. Sakurada, ... and M. A. Batista (2022) Nitrogen fertilizers technologies for corn in two yield environments in South Brazil. *Plants* 11:1890, <https://doi.org/10.3390/plants11141890>
- Castellanos R. J. Z., J. D. Etchevers B., M. Peña D., S. García H., I. Ortiz M., A. Arango G., ... y C. Venegas V. (2019) ¿Cómo Crece y se Nutre una Planta de Maíz? Fertilab. Querétaro, México. 124 p.
- Castellanos R. J. Z., J. X. Uvalle B. y A. Aguilar S. (2000) Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2a edición. Intagri. Celaya, Guanajuato, México. 81 p.
- CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (2012) Manual de Determinación de Rendimiento. CIMMYT. México, D. F. 42 p.
- Dhital G., S. Marahatta, T. B. Karki and K. B. Basnet (2022) Response of different levels of nitrogen and plant population to grain yield of winter hybrid maize in Chitwan valley. *Agronomy Journal of Nepal* 6:59-68, <https://doi.org/10.3126/ajn.v6i1.47938>
- Duarte R. C. R. M. and A. P. Duarte (2023) Density and population arrangement of off-season corn cultivars: agronomic parameters and leaf burn by frost. *Bragantia* 82:e20230038, <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230038>
- Etchevers-Barra J. D. (1992) Manual de Métodos para Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 111 p.
- Etchevers-Barra J. D. y J. Padilla-Cuevas (2016) Diagnóstico de la fertilidad del suelo. In: *Nutrición de Cultivos*. Segunda edición. G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez y F. C. Gómez-Merino (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. pp: 221-239.
- Farzadfar S., J. D. Knight and K. A. Congreves (2021) Soil organic nitrogen: an overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition. *Plant and Soil* 462:7-23, <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04860-w>
- García E. (2004) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 4a edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 90 p.
- González-Mateos R., D. H. Noriega-Cantú, V. H. Volke-Haller, J. Pereyda-Hernández, V. M. Domínguez-Márquez y E. R. Garrido-Ramírez (2018) Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) y respuesta a fuentes y dosis de fertilizantes, y biofertilizantes, en Guerrero, México. *Agroproductividad* 11:22-31.
- Goodkind A. L., S. K. Thakrar, S. Polasky, J. D. Hill and D. Tilman (2023) Managing nitrogen in maize production for societal gain. *PNAS Nexus* 2:1-11, <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad319>
- Govindasamy P., S. K. Muthusamy, M. Bagavathiannan, J. Mowrer, P. T. K. Jagannadham, A. Maity, ... and G. Tiwari (2023) Nitrogen use efficiency a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 14:1121073, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>
- Halvorson A., F. Schweissing, M. Bartolo and C. Reule (2005) Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen. *Agronomy Journal* 97:1222-1229, <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0279>
- He S. G., R. Ma, N. N. Wang, S. Wang, T. X. Li and Z. C. Zheng (2022) Comparison of nitrogen losses by runoff from two different cultivating patterns in sloping farmland with yellow soil during maize growth in Southwest China. *Journal of Integrative Agriculture* 21:222-234, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63496-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63496-7)
- Kihara J., G. Nziguheba, S. Zingore, A. Coulibaly, A. Esilaba, V. Kamambe, ... and J. Huisling (2016) Understanding variability in crop response to fertilizer and amendments in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 229:1-12, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.012>
- Kopittke P. M., N. W. Menzies, P. Wang, B. A. McKenna and E. Lombi (2019) Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* 132:105078, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Lu C., J. Zhang, P. Cao and J. L. Hatfield (2019) Are we getting better in using nitrogen?: variations in nitrogen use efficiency of two cereal crops across the United States. *Earth's Future* 7:939-952, <https://doi.org/10.1029/2019EF001155>
- María R. A., I. Rojas M., M. A. Ávila P. y J. A. Gámez V. (2003) Producción de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala. Folleto para Productores No. 3. Campo Experimental Tlaxcala, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Tlaxcala, México. 16 p.
- Martínez-Gutiérrez A., B. Zamudio-González, M. Tadeo-Robledo, A. Espinosa-Calderón, J. C. Cardoso-Galvão y M. G. Vázquez-Carrillo (2022) Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13:289-301, <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2782>
- Meena P. B., P. Jha, K. Ramesh, A. K. Biswas, R. Elanchezian, S. Neenu, ... and A. K. Patra (2020) Modified split application of nitrogen with biochar improved grain yield and nitrogen use efficiency in rainfed maize grown in Vertisols of India. *bioRxiv*, 1-38, <https://doi.org/10.1101/2020.07.13.200345>
- Meisinger J. J., J. S. Schepers and W. R. Raun (2008) Crop nitrogen requirement and fertilization. In: *Nitrogen in Agricultural Systems*. J. S. Schepers and W. R. Raun (eds.). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp:563-612, <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c14>
- Morris T. F., T. S. Murrell, D. B. Beegle, J. J. Camberato, R. B. Ferguson, J. Grove, ... and H. Yang (2018) Strengths and limitations of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agronomy Journal* 110:1-37, <https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0112>
- Qiu S. J., P. He, S. C. Zhao, W. J. Li, J. G. Xie, Y. P. Hou, ... and J. Y. Jin (2015) Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in Northeast China. *Agronomy Journal* 107:305-313, <https://doi.org/10.2134/agronj13.0567>
- Quiroz M. J., D. J. Pérez L., A. González H., M. Rubí A., F. Gutiérrez R., J. R. P. Franco M. y J. F. Ramírez D. (2017) Respuesta de 10 cultivares de maíz a la densidad de población en tres localidades del centro mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1521-1535, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.508>
- Ramírez-Díaz J. L., I. Alemán-de la Torre, E. Bautista-Ramírez, V. A. Vidal-Martínez, Y. Salinas-Moreno y A. Ledesma-Miramontes (2021) Respuesta de híbridos subtropicales de maíz a la densidad de población. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:173-182, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.173>
- Raza S. and B. S. Farmaha (2022) Contrasting corn yield responses to nitrogen fertilization in southeast coastal plain soils. *Frontiers in Environmental Science* 10:955142, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.955142>
- Sánchez M. P. A. (2021) Suelos del Trópico: Características y Manejo. O. Muñoz U. (trad.). 2a edición. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México. 683 p.
- Sánchez-Hernández M. A., J. B. Jiménez-Maya, G. Morales-Terán, R. Acevedo-Gómez, C. Antonio-Estrada y C. Villanueva-Verduzco (2019) Rendimiento de grano en maíces adaptados a condiciones de la baja cuenca del Papaloapan. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22:519-529, <https://doi.org/10.56369/tsaes.2608>
- Tasistro A. y R. Camas-Gómez (2016) Contribución al desarrollo del manejo del nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.) (La Frailesca, Chiapas), México. In: *Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, 24-28 de octubre 2016. Quito, Ecuador. pp:40-49.
- Tasistro A., R. I. Ortiz-Monasterio y R. Camas-Gómez (2021) Contribución hacia un sistema para recomendar nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.) (La Frailesca, Chiapas). In: *Uso Eficiente de Nitrógeno en la Agricultura*. V. Saynes-Santillán, F. Fernández-Luqueño y J. I. Ortiz-Monasterio Rosas (eds.). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Ciudad de México. pp:13-17.
- Volke-Haller V. H. (2008) Estimación de Funciones de Respuesta para Información de Tipo no Experimental, Mediante Regresión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México. 113 p.
- Zamudio G. B., G. Velázquez C., A. Espinosa C. y J. L. Arellano V. (2017)

Maíz - Texcoco. *In:* Agenda Técnica Agrícola Estado de México. R. Flores L. y E. D. Sotelo R. (comps.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México. pp:217-221.

Zingore S. and S. Njoroge (2022) Soil organic matter regulates maize productivity and fertilizer response in maize production. *Growing Africa* 1:8-11.

