

EFFECTO DE AMINOÁCIDOS FOLIARES EN LA EXTRACCIÓN Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN MAÍZ

EFFECT OF FOLIAR AMINO ACIDS ON THE UPTAKE AND REMOVAL OF NUTRIENTS IN MAIZE

Aarón Martínez-Gutiérrez¹, Benjamín Zamudio-González^{2*}, João Carlos Cardoso Galvão³, Alejandro Espinosa-Calderón², Margarita Tadeo-Robledo⁴, Antonio Vázquez-Alarcón⁵ y Yuri Villegas-Aparicio¹

¹Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO)/TecNM, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. ³Universidad Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. ⁴Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. ⁵Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (bzamudiog@yahoo.com.mx)

RESUMEN

El uso de semillas mejoradas, junto con la adopción de las mejores prácticas agrícolas, como la nutrición oportuna y balanceada, posibilita a las plantas expresar su máximo potencial genético. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de aminoácidos sobre la extracción y remoción de nutrientes en el cultivo de maíz en Valles Altos del centro de México. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con arreglo en parcelas divididas en dos ambientes. Se determinó el rendimiento de grano y materia seca de las plantas; además, se analizó en laboratorio el contenido de macro y micronutrientes en la parte aérea del tejido vegetal y el grano. Se calculó la extracción total y remoción de nutrientes en el grano de maíz. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza combinado y comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$). La aplicación de aminoácidos foliares incrementó la producción de biomasa y grano de maíz, así como los niveles de extracción y remoción de nutrientes. La demanda de macronutrientes en kg ha^{-1} para cosechar 12.3 t ha^{-1} de grano fue 292.3 de N, 87.2 de P, 238.1 de K, 66.2 de Ca, 47.8 de Mg, y de micronutrientes en g ha^{-1} de 201 de Cu, 586.4 de Mn, 375.6 de Zn y 115.6 de B. Se observaron altos porcentajes de remoción de P (74 %), N (58 %) y Zn (54 %) en el grano, por lo que se sugiere la incorporación de estos nutrientes al suelo y aplicación de foliares como complemento a la nutrición.

Palabras clave: *Zea mays* L., bioestimulante, materia seca, requerimiento nutricional.

SUMMARY

The use of improved seeds along with the adoption of the best agricultural practices, such as timely and balanced nutrition, enables plants to express their maximum genetic potential. The objective of this study was to evaluate the effect of foliar application of amino acids on the extraction and removal of nutrients in the maize crop in the highlands of central Mexico. An experimental design of randomized complete blocks with four replications was used, under a split-plots arrangement into two environments. The grain yield and dry matter of the plants were determined; in addition, the content of macro and micronutrient content in the aerial part of the plant tissue and the grain was analyzed in laboratory. The total extraction and removal of nutrients in the maize grain was calculated. Data were subjected to combined analysis of variance and comparison of means (Tukey, $P \leq 0.05$). The application of foliar amino acids increased the production of biomass and grain in maize, as

well as the levels of extraction and removal of nutrients. The macronutrients requirement, in kg ha^{-1} , to harvest 12.3 t ha^{-1} of grain was 292.3 N, 87.2 P, 238.1 K, 66.2 Ca, 47.8 Mg, and in micronutrients, in g ha^{-1} , 201 of Cu, 586.4 Mn, 375.6 Zn and 115.6 B. High percentages of removal of P (74 %), N (58 %) and Zn (54 %) were observed in the grain; therefore, it is suggested the incorporation of these nutrients to the soil and foliar application as a complement to nutrition.

Index words: *Zea mays* L., biostimulant, dry matter, nutritional requirement.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz desempeña un papel clave en los sistemas de producción en México, debido a sus atributos de rendimiento, adaptabilidad y estabilidad de producción. Es uno de los cereales más cultivados y consumidos en el país por sus características nutricionales y nutracéuticas. A nivel nacional se consumen aproximadamente 40 millones de toneladas de grano de maíz, de las cuales 18 millones de toneladas son importadas para abastecer la demanda (SIAP, 2022).

No obstante, en el territorio nacional se cuenta con potencial de producción, debido a las condiciones de climas favorables en las diferentes regiones, tierras de labor con capacidad productiva, semillas nativas y mejoradas con adaptación y estabilidad de rendimiento; y puede alcanzarse haciendo uso de tecnologías amigables al medio ambiente, como la fertilización foliar que garantiza el incremento en la producción de grano.

Dentro de estas tecnologías, es pertinente un programa de fertilización que permita la nutrición adecuada de la planta, que considere el balance de nutrientes requeridos con base en la fertilidad del suelo, análisis foliar, fertilizantes aplicados, épocas de mayor demanda,

el rendimiento estimado (Ciampitti y Vyn, 2014) y se consideren las condiciones climáticas, principalmente en cuanto a la precipitación pluviométrica. Una de las técnicas agronómicas altamente eficiente es la fertilización foliar, que favorece la asimilación de nutrientes en la planta (Fernández *et al.*, 2015), al contribuir con una agricultura sostenible que mitigue los efectos de contaminación del suelo y agua.

La aplicación de aminoácidos foliares como complemento a la fertilización del suelo se considera una de las estrategias agronómicas apropiadas que permiten el incremento de la producción y la calidad del producto cosechado (Parrado *et al.*, 2008; Tejada *et al.*, 2018), lo que está asociado con una mayor extracción y remoción de nutrientes en plantas de maíz (Bender *et al.*, 2013) debido a que los aminoácidos libres participan directamente en el metabolismo de las plantas y sus funciones están relacionadas con los aspectos fisiológicos y biológicos a través de la formación de proteínas y enzimas (du Jardin, 2015).

Por otra parte, la producción de maíz en los Valles Altos del Estado de México con bajas temperaturas conlleva un ciclo largo (220- 240 días de la siembra en abril a la cosecha en noviembre). En este ciclo largo ocurren condiciones en las cuales las plantas no se desarrollan adecuadamente por agobios bióticos y abióticos como clima adverso, suelos erosionados, ácidos, con baja fertilidad y variedades de bajo potencial de rendimiento, susceptibles al acame, lo que se traduce en pérdidas de producción (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022).

La intensidad y la duración de cualquier agobio o estrés determinan las pérdidas de producción; en este contexto, la aplicación de aminoácidos puede constituir una tecnología para mitigar el efecto del estrés en las etapas críticas de germinación, crecimiento vegetativo, floración y llenado de grano (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2022). Lo anterior resulta una ventaja debido al aporte energético con vistas a la prevención y recuperación de estrés de la planta. Los aminoácidos libres no pueden sustituir en su totalidad los

nutrientes requeridos por las plantas (du Jardin, 2015); sin embargo, al contener elementos esenciales para éstas, pueden favorecer la extracción de nutrientes y satisfacer la demanda nutricional del cultivo.

Existen pocos datos recientes respecto al requerimiento nutricional del cultivo de maíz, la mayoría de las publicaciones se centran principalmente en los macronutrientes primarios (NPK), elementos de mayor demanda, y se han realizado en otros países con genotipos diferentes, en su mayoría híbridos transgénicos (Bender *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018), que demandan mayor cantidad de nutrientes.

En este contexto, ante la falta de información sobre la extracción de nutriente en híbridos mejorados para las condiciones de Valles Altos del Estado de México, es relevante actualizar datos que permitan a los productores definir las cantidades óptimas que deben ser aplicadas al suelo a fin de mantener la fertilidad y alcanzar el rendimiento óptimo (Martínez *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de aminoácidos aplicados al follaje sobre la extracción y remoción de nutrientes en el cultivo de maíz en dos ambientes de Valles Altos de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Se establecieron dos experimentos en Valles Altos del Estado de México en el ciclo agrícola primavera-verano (PV) 2017. El primer experimento se ubicó en Jocotitlán (JOC) (19° 43' N, 99° 51' O, 2700 msnm), con precipitación media anual de 669.0 mm, donde la temperatura oscila entre 3.0 y 24.0 °C; la siembra se realizó el 10 de abril. El segundo experimento se ubicó en Temascalcingo (TEM) (19° 55' N, 100° 00' O, 2350 msnm), precipitación media anual de 874.6 mm, temperatura entre 10.6 y 23.0 °C (NASA, 2022). Para conocer las características químicas del suelo se colectaron muestras para su análisis, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características químicas del suelo en dos ambientes antes de la siembra. Profundidad de muestreo 0-20 cm. Ciclo agrícola P-V 2017.

Ambiente	pH	MO (%)	N-NO ₃	P ⁺	K	S	Ca	Mg	Al ³⁺	H+Al	CIC	V ⁺⁺	m [†]
			(mg dm ⁻³)						(cmol _c dm ⁻³)				
Jocotitlán	5.6	2.1	11.9	46.8	205	5.6	5.25	2.32	0.2	0.8	10.1	80.9	1.8
Temascalcingo	7.0	1.9	15.9	72.2	350	2.8	6.64	3.24	0.0	0	11.0	95.0	0

[†]Método de Bray 1, ⁺⁺Saturación de base, ⁺Saturación de aluminio, CIC: capacidad de intercambio catiónico, micronutrientes (mg dm⁻³), Jocotitlán: B = 0.18, Cu = 1.01, Fe = 96.1, Mn = 35.8, Zn = 0.57, Temascalcingo: B = 0.65, Cu = 1.01, Fe = 46.4, Mn = 39.7, Zn = 2.57.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron los tratamientos resultantes de la combinación de dos híbridos de maíz (H-50 y H-49 AE) con las dosis de aplicación foliar que se describen en el Cuadro 2. Los híbridos se sembraron a una densidad de 75,000 plantas ha⁻¹ y los tratamientos foliares (F) con dosis de 2.5 kg ha⁻¹ se realizaron en dos etapas del cultivo: entre V₅-V₆ y V₇-R₁, respectivamente (suma de 5.0 kg ha⁻¹); las aplicaciones se realizaron entre 7:00 y 9:00 am, cuando la temperatura oscilaba entre 7.0 y 15.0 °C.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con arreglo en parcelas divididas en dos ambientes, donde la parcela grande fueron las aplicaciones foliares y la pequeña los híbridos; la parcela experimental fue de cuatro surcos de 0.80 × 8 m de longitud y se consideró como parcela útil a los dos surcos centrales (4.8 m²).

Manejo de los experimentos

Previo a la siembra, las semillas fueron tratadas con Crusier® (tiаметoxam, 50 mL ha⁻¹) e insecticida Force® (10 teflutrina, 15 kg ha⁻¹). La fertilización al suelo fue con dosis de 250-60-60 kg ha⁻¹ de N-P-K. La fertilización se realizó en tres aplicaciones; la primera en la siembra con 60 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, (urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio), la segunda y tercera aplicación fueron con dosis de 120 kg ha⁻¹ de N entre las etapas V₄-V₆ y de 70 kg ha⁻¹ de N entre V₁₀-V₁₂, respectivamente.

El control de malezas se realizó de forma mecánica con escarda en la etapa vegetativa (V₄) y posteriormente se aplicó herbicida Lumax® (S-metolaclor, atrazina y mesotrione, 4 L ha⁻¹). Para el control de plagas se utilizó Karate Zeón® (Lambda cihalotrin, 250 mL ha⁻¹) y Denim® (Emamectina, 100 mL ha⁻¹). Se aplicó Piori® Xtra (Azoxistrobina, Ciproconazol, 350 mL ha⁻¹) al follaje para el control de enfermedades.

Variables respuesta

Para el rendimiento de grano (t ha⁻¹) se colectaron todas

las mazorcas del área útil de las parcelas (4.8 m²), mismas que fueron trilladas y pesadas. Se determinó el contenido de humedad del grano con el medidor de humedad (Modelo G610i, Hegaka, Sao Paulo, Brasil); posteriormente, los valores obtenidos se ajustaron a 14 % de humedad y se extrapolaron a t ha⁻¹.

Al final del ciclo productivo (R6), se colectaron dos plantas para la determinación de materia seca (MS) y contenido de nutrientes. Las dos plantas fueron cortadas a ras del suelo al azar en las dos líneas centrales, y se separaron en dos componentes: parte aérea (hojas, tallo, totomoxtle, olote) y grano. Las muestras se secaron en una estufa de aire forzada a 65° C hasta alcanzar peso constante (4 % de humedad). Una vez pesadas las muestras, con una balanza electrónica digital, se procesaron hasta pasar un tamiz de 2 mm utilizando un molino Wiley (Modelo 4 Wiley Mill, Thomas Scientific, Swedesboro, New Jersey, EUA). Las muestras se enviaron a laboratorio para su análisis. La digestión de cada muestra se realizó con una mezcla diácida, relación 4:1 de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido perclórico (HClO₄). La determinación del contenido de calcio, magnesio, cobre, manganeso y zinc fue por espectrofotometría de absorción atómica, para fósforo y boro fue por colorimetría (molibdovanadato amarillo), para potasio por flamometría y el nitrógeno total fue determinado por el método Kjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999).

Para determinar la acumulación de materia seca, extracción y remoción de nutrientes e índice de cosecha se siguió la metodología descrita por Dobermann (2005). La materia seca total fue extrapolada a t ha⁻¹. La materia seca total de la planta entera se obtuvo con la sumatoria de los valores de la MS de los órganos (parte aérea + grano) de las plantas. El índice de cosecha (IC) se estimó con el peso de la MS del grano (órgano de interés económico) dividido por la MS total de planta entera.

Las concentraciones de macronutrientes (g kg⁻¹) y micronutrientes (mg kg⁻¹) en los tejidos y el peso seco (g) se convirtieron en kg ha⁻¹. Se utilizó algebraicamente para cálculo de extracción de nutrientes, la siguiente expresión: EN = (CN × MS)/1000. donde EN: extracción de

Cuadro 2. Composición química de los tratamientos foliares y dosis aplicadas en las plantas.

Tratamientos foliares	Composición química	Dosis (kg ha ⁻¹)
Testigo (T1)	Aspersión de solo agua (testigo)	0
Eurobor (T2)	5 % N orgánico (NO), 25% aminoácidos libres (AL) y 3 % B	2.5
Eurologo (T3)	5 % NO, 25 % AL y micronutrientes (Zn 1 %, Mn 0.5 %, Fe 0.5 %, B 0.1%, Mo 0.01 %).	2.5
Eurodual (T4)	3 % NO, 10 % carbono orgánico (CO), 15 % AL, 8 % CaO y 2 % MgO.	2.5

nutrientes (kg ha^{-1}), CN: concentración de nutrientes en la materia seca del órgano de la planta (g kg^{-1}), MS: materia seca del órgano de la planta (kg ha^{-1})/1000. La extracción total de cada nutriente por la planta entera fue la suma de la acumulación de nutriente en el rastrojo (hoja, tallo, totomoxtle, olote) y grano. Para la remoción de nutrientes se consideró la acumulación total de cada nutriente en el grano.

Análisis estadístico

Las variables fueron sometidas a análisis de varianza combinado a fin de constatar las significancias de ambientes (A), híbridos (H), foliares (F) y la existencia de interacciones entre los factores, con el programa estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2022). Se utilizó la prueba de separación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) para comparación de medias de rendimiento, producción de biomasa, extracción y partición de nutrientes e índice de cosecha de cada nutriente al final del ciclo productivo (R6).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia seca y rendimiento de grano

Para la materia seca, el análisis de varianza combinado permitió identificar interacción $H \times F$ ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3). Esta interacción positiva permite observar respuestas diferenciales de los híbridos dentro de cada tratamiento foliar, sólo el híbrido H-49 AE no mostró diferencia en el T4 con respecto al testigo (Cuadro 3). En promedio, se produjeron 28.2 t ha^{-1} de materia seca en R6. Se observa

una respuesta positiva contundente de los tratamientos foliares que superó al testigo hasta en 3.9 t ha^{-1} , en virtud de la mejora de la nutrición en la fertilización foliar de aminoácidos. Así, esta tendencia de mayor capacidad de acumulación de materia seca es consistente con lo que se observa actualmente en los híbridos con alto potencial productivo.

En promedio de ambientes e híbridos, en términos porcentuales, la acumulación de materia seca en el grano fue del orden de 52, 50, 49 y 48 % en los foliares T4, T3, T2, y T1, respectivamente. Los datos confirman lo reportado por Ciampitti y Vyn (2012), que observaron índice de cosecha (IC) de 48 y 50 % en genotipos antiguos y modernos, respectivamente. Quezada *et al.* (2015) observaron índice de cosecha de 52 % cuando aplicaron subproductos de biosíntesis de aminoácidos (TRP + LYS), contra 50 % en los tratamientos testigo (nitrato de amonio y sulfato de amonio). Si el aumento en el rendimiento de grano fuera proporcionalmente mayor que el aumento en la biomasa total, el IC podría mejorarse (Martínez *et al.*, 2018) debido a que el IC refleja la eficiencia de la remoción de nutrientes en el órgano de interés económico del cultivo (Bender *et al.*, 2013). Se juzga que la mejora observada de los IC se debió parcialmente a la aplicación de aminoácidos o a la genética de los materiales. De acuerdo con Quezada *et al.* (2015), las concentraciones hormonales o metabolitos secundarios en los aminoácidos impulsan mayor producción de materia seca en el grano.

En promedio, los híbridos produjeron aproximadamente 12.3 t ha^{-1} de grano, con un intervalo de 11.4 a 13.3 t ha^{-1}

Cuadro 3. Producción de materia seca total (t ha^{-1}) y rendimiento de grano (t ha^{-1}) de maíz al final del ciclo en función de tratamientos foliares e híbridos. Media de dos ambientes. Ciclo agrícola P-V 2017.

Foliares	Materia seca total			Rendimiento de grano		
	Híbridos		Media de foliares	Híbridos		Media de foliares
	H-50	H-49AE		H-50	H-49AE	
Testigo -T1	24.5 bB	27.6 abA	26.0 c	11.4 bA	11.4 aA	11.4 b
Eurobor - T2	29.3 aA	29.4 aA	29.3 ab	12.6 aA	12.0 aA	12.3 a
Eurologo -T3	31.3 aA	25.7 abB	29.9 a	13.7 aA	12.8 aB	13.3 a
Eurodual - T4	29.3 aA	28.5 abB	27.5 bc	12.9 aA	11.4 aB	12.2 a
Media de híbridos	28.6 A	27.8 A		12.7 A	11.9 B	
Media general	28.2			12.3		
CV (%)	8.24			6.5		

Para cada variable, medias seguidas por la misma letra minúscula en la columna y mayúscula en la línea no difieren entre sí (Tukey, $P \leq 0.05$), CV: coeficiente de variación.

Cuadro 5. Extracción (parte aérea + grano) de nutrientes en plantas de maíz, en dos ambientes, dos híbridos y cuatro tratamientos foliares en el ciclo agrícola, P/V-2017.

Factores y niveles	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Cu	Mn	Zn	B
	(kg ha ⁻¹)			(g ha ⁻¹)					
Ambientes									
TEM	283 b	100 a	253 a	65 a	50 a	197 a	787 a	433 a	117 a
JOC	301 a	75 b	222 b	67 a	46 b	206 a	387 b	318 b	114 a
Híbridos									
H-50	313 a	95 a	254 a	74 a	53 a	219 a	713 a	221 a	120 a
H-49 AE	272 b	79 b	221 b	59 b	42 b	184 b	460 b	175 b	111 a
Foliares									
Testigo - T1	253 b	92 a	208 b	55 b	45 b	193 a	448 b	335 c	82 c
Eurobor - T2	307 a	82 b	256 a	72 a	50 a	204 a	624 a	356 bc	153 a
Eurologo - T3	317 a	83 b	254 a	71 a	51 a	216 a	603 a	383 ab	120 b
Eurodual - T4	293 a	78 b	234 ab	67 a	45 b	192 a	670 a	428 a	107 b
Media	292	84	238	66	48	201	586	376	116
CV (%)	9.8	17.0	12.7	13.2	11.3	16.8	17.0	18.0	16.5

Para cada variable (extracción), dentro de cada factor de variación, las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). Para convertir P₂O₅ en P y K₂O en K, dividir, respectivamente, los valores de conversión por 2.29 y 1.20. CV: coeficiente de variación.

orgánico o inorgánico en el suelo (Cao *et al.*, 2021). Otra premisa puede ser la influencia de temperaturas bajas del ambiente, que permitieron mayor eficiencia en la absorción y asimilación de los compuestos nitrogenados (aminoácidos), lo cual llevó a mayor acumulación de N en las plantas desarrolladas en este ambiente. Las mayores tasas de extracción observados en Temascalcingo para P, K, Mg y Zn se debieron al alto contenido de estos nutrientes en el suelo (Cuadro 1), aunado al aprovechamiento de los aminoácidos foliares por las plantas de maíz, para algunos elementos donde el testigo fue igual o mayor que el T4.

El híbrido H-50 absorbió mayores cantidades de nutrientes en todos los casos (Cuadro 5), excepto para B, lo cual está de acuerdo con los rendimientos mayores presentados para este híbrido (Cuadro 3), reflejado en la magnitud de extracción. El componente genético puede determinar las cantidades de nutrientes absorbidos por las plantas y translocados a los granos; no obstante, los híbridos dentro de la especie pueden diferir en la capacidad de absorber y utilizar los nutrientes presentes en el suelo. En otros estudios se reportaron valores diferenciales de extracción de nutrientes en híbridos diferentes (Bender *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018).

Los tratamientos foliares influenciaron significativamente la extracción de los nutrientes ($P \leq 0.05$), excepto para Cu (Cuadro 5). Con respecto al N absorbido, la extracción

fue 25, 21 y 16 % más alta en los tratamientos T2, T3 y T4, respectivamente, en relación con el testigo; ésto se debió a la concentración de N orgánico y al porcentaje de aminoácidos libres en los tratamientos foliares (Cuadro 2). El nitrógeno está involucrado en el metabolismo vegetal, participando en la biosíntesis de proteínas y clorofilas (Andrade *et al.*, 2003), de modo que una mayor oferta del nutriente en forma de aminoácidos contribuye al aumento de la tasa fotosintética, llevando a una mayor acumulación de biomasa y, consecuentemente, mayor extracción de N por las plantas (Cuadro 5).

Las cantidades de macro y micronutrientes acumulados en el grano entre los tratamientos foliares se presentan en el Cuadro 6. Respecto al N acumulado en el grano, en términos porcentuales, el promedio fue de 58 % del total extraído en el grano por el cultivo, valores por debajo de lo observado por Bender *et al.* (2013), quienes mencionan que cerca de 64 % del N extraído fue translocado para el grano. Quezada *et al.* (2015) reportaron índices de cosecha de N de 64-67 % cuando aplicaron subproductos de la biosíntesis comercial de los aminoácidos triptófano (TRP) y lisina (LYS) contra 61 % observado en los testigos (nitrato de amonio y sulfato de amonio), lo que confirma que los aminoácidos foliares favorecen una mayor acumulación de N en el grano de maíz.

Existió diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre los factores

estudiados para extracción de P (Cuadro 5); sin embargo, para el factor foliar la extracción de P presentó mejor respuesta en el testigo foliar, la extracción de P disminuyó cuando se aplicaron aminoácidos foliares; en contraste, Bender *et al.* (2013), al evaluar híbridos mejorados, reportaron una extracción total de 114 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con una productividad media de 12.0 t ha⁻¹, rendimientos similares a los de este trabajo. La acumulación de P en el grano no mostró diferencia significativa (Cuadro 6); en promedio, 64 kg ha⁻¹ de P son direccionados en el grano al final del ciclo, lo que representa el 74 % del total de P absorbido, por lo que es importante suministrar estas cantidades extraídas en el grano en los cultivos posteriores. Lo anterior permite deducir que el fósforo está ligado a la función del N; es decir, a mayor contenido de N en el grano, mayor acumulación de P (Zamudio-González *et al.*, 2016). El alto porcentaje de P en el grano explicaría la disminución de P en el tejido de la planta.

Con la aplicación de aminoácidos aumentó significativamente la extracción de K en plantas de maíz (Cuadro 5). Los mejores tratamientos foliares fueron T2 y T3. En promedio de los tratamientos foliares, la acumulación de K en el grano fue de 42 kg ha⁻¹ de K₂O (Cuadro 6); es decir, 18 % del total absorbido por la planta fue direccionado hacia el grano; en contraste, Zamudio-González *et al.* (2015) observaron remoción de 14.4 kg ha⁻¹ de K₂O en el grano, lo cual confirma la importancia de la aplicación foliar de aminoácidos, lo que garantiza mayor contenido de nutrientes en el grano de maíz.

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos foliares tanto para la extracción como para la acumulación de Ca en el grano del maíz (Cuadros 5 y 6). En ambos casos sobresalen los tratamientos foliares T2, T3 y T4; no obstante, el mayor valor de este nutriente acumulado en el grano fue observado en T4 (Eurodual) debido a la composición de 8 % de CaO, aminoácidos libres de bajo

peso molecular y asimilables para la planta. Esta eficiencia de absorción foliar de los aminoácidos se correlaciona con la baja disponibilidad de Ca²⁺ en el suelo en los ambientes (Cuadro 1). Por otra parte, la alta disponibilidad de K⁺ (Cuadro 1) provoca inhibición competitiva entre cationes en el suelo (de Resende *et al.*, 2006), lo que posiblemente favoreció a T4, que contiene Ca y aminoácidos libres.

Al final del ciclo, en promedio, 1.9 % de Ca del total extraído por la planta fue direccionado hacia el grano de maíz. La poca movilidad que presenta Ca en el floema de la planta dificulta su redistribución en el grano. De acuerdo con Ciampitti y Vyn (2014) y de Resende *et al.* (2016), las concentraciones de Ca en las mazorcas (olote y grano) son poco perceptibles en los análisis de estos componentes de la planta, acumulando mayores cantidades principalmente en las hojas (más del 50 %) y en los tallos de la planta; resultado semejante fue observado en este estudio.

Para la extracción de Mg destacan T2 y T3 con 50 y 51 kg ha⁻¹ (Cuadro 5). Los tratamientos foliares no difirieron en la partición de Mg en el grano (Cuadro 6). En promedio, del total de Mg absorbido, cerca del 26 % fue dirigido al grano, lo que representa 12 kg ha⁻¹, el 74 % restante se acumuló en la parte aérea de la planta. Cakmak y Yazici (2010) mencionan que en la nutrición de las plantas el Mg favorece la translocación de fotoasimilados y carbohidratos en la planta. La aplicación foliar de aminoácidos con presencia de Mg presenta un efecto favorable en la tasa fotosintética asociado con aumento en el contenido de clorofila de la hoja (Andrade *et al.*, 2003), lo que puede llevar a una mayor acumulación de MS y rendimiento de grano.

El factor foliar alteró significativamente la extracción de los microelementos, excepto para Cu, donde no se detectó diferencia significativa ($P > 0.05$) (Cuadro 5). El Cu tiene fuerte afinidad con el átomo de N del grupo amino y los compuestos nitrogenados solubles, como los

Cuadro 6. Medias de partición de nutrientes en el grano de maíz en tratamientos foliares. Media de dos ambientes y dos híbridos. Ciclo agrícola PV-2017.

Tratamientos foliares	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Cu	Mn	Zn	B
	(kg ha ⁻¹)				(g ha ⁻¹)				
T1	138 b	63 a	38 b	1.0 b	12 a	50 a	37 a	172 b	16 b
T2	179 a	65 a	42 ab	1.3 a	13 a	45 ab	44 a	205 ab	30 a
T3	188 a	66 a	45 a	1.3 a	12 a	42 ab	52 a	222 a	28 a
T4	178 a	61 a	43 ab	1.4 a	12 a	34 b	46 a	195 ab	26 a
Media	171 (58)	64 (74)	42 (18)	1.2 (1.9)	12 (26)	43 (21)	45 (9)	198 (54)	25 (22)
CV (%)	13.5	18.3	15.0	18.5	17.5	29.2	15.8	18.2	20.5

Para cada variable (remoción), las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). Valores entre paréntesis corresponden a los porcentajes translocados a los granos. CV: coeficiente de variación.

aminoácidos, y actúa como transportador de ese nutriente en xilema y floema (Printz *et al.*, 2016), lo que llevó a una mayor acumulación de Cu en el grano de maíz en T2 y T3 (Cuadro 6). En promedio, 21 % de Cu del total extraído fue translocado hacia el grano, lo que corresponde a 43 g ha⁻¹. Martínez *et al.* (2018) observaron acumulación de 14 % de Cu en el grano de maíz, 48 % en las hojas y 33 % en los tallos de la planta; entonces, es evidente que las concentraciones de Cu predominan en la parte aérea de la planta, particularmente en las hojas de maíz.

La extracción de Mn presentó mejores respuestas en los tratamientos T4, T2 y T3 con relación al testigo (T1) (Cuadro 5). La acumulación de Mn en el grano no fue afectada por los tratamientos foliares (Cuadro 6). En promedio, 45 g ha⁻¹, equivalentes a una proporción de 9 % se direcciona hacia el grano de maíz. Lo anterior puede deberse que este elemento se acumula en mayor cantidad en el tallo como órgano de reserva (Bender *et al.* 2013). Martínez *et al.* (2018) reportaron que el 50 % de Mn se acumuló en el tallo de la planta y apenas el 8 % de Mn fue acumulado en el grano de maíz.

La extracción de Zn y B aumentó significativamente en los tratamientos T2, T3 y T4 (Cuadro 5). El T3 incluyó en su composición 1 % de Zn (Cuadro 2) y fue este tratamiento foliar el que presentó mayor concentración de Zn en el grano; esta respuesta positiva en el cultivo del maíz se debe a la función del Zn en la producción de triptófano, precursor del ácido indol acético en la planta (Suman *et al.*, 2017).

El porcentaje de Zn direccionado al grano fue de 54 % del total extraído por la planta. El resultado ocurrió en menor magnitud que el 62 % reportado por Bender *et al.* (2013) y mayores a lo reportado por Martínez *et al.* (2018) con 45 % de Zn translocados al grano de maíz. Según Heckman *et al.* (2003), la redistribución del Zn acumulado puede variar de acuerdo con las prácticas de manejo agronómico, la productividad y la concentración de nutrientes en los granos de maíz. En los tratamientos foliares las plantas fueron capaces de mantener proporciones más elevadas de Zn en los granos, que constituyen un órgano de mayor demanda de este micronutriente en la etapa de maduración.

Para extracción de B, T2 fue 53 % más eficiente que T1 (testigo). De lo anterior, se deduce que el 3 % adicional de B contenido en T2 (Cuadro 2) permitió mejoras en la absorción del tratamiento foliar. En la acumulación de B en el grano se observó respuesta diferencial entre los tratamientos foliares. En promedio, el 22 % del B total extraído por la planta fue acumulado en el grano (Cuadro 6). Estos porcentajes bajos se deben a que el B es un elemento que tiene poca movilidad en el floema y es

translocado principalmente a través del xilema de la planta.

La aplicación foliar con B es más efectiva en los periodos de mayor demanda, específicamente entre V_T (panojamiento) y R₁ (floración/polinización), lo que mejora la translocación del B en el grano. La exigencia de B en la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico en maíz (Alimuddin *et al.*, 2020) reduce la acumulación del boro en el grano; sin embargo, mejora las características agronómicas de las mazorcas, incrementando la productividad del cultivo.

CONCLUSIONES

Los aminoácidos aplicados de manera foliar tuvieron efecto en el aumento de biomasa y rendimiento de maíz, lo que se refleja en mayor extracción y remoción de los nutrientes en el grano de maíz. Los resultados de este trabajo pueden utilizarse en programa de fertilización y brindan la oportunidad de ajustar las recomendaciones para atender los requerimientos nutricionales de la planta, y mejorar rendimientos de grano en Valles Altos. En promedio, la demanda nutricional corresponde a los siguientes indicadores para cada tonelada de grano producida por los híbridos: la extracción total calculada por parte aérea + granos de macronutrientes (kg ha⁻¹) fue de 23.7, 7.0, 19.4, 5.4 y 3.9 de N, P₂O₅, K₂O, Ca y Mg, respectivamente. La extracción por tonelada de grano de micronutrientes en (g ha⁻¹) fue 16.3, 47.7, 30.5 y 8.4 de Cu, Mn, Zn y B, respectivamente. Las fracciones acumuladas en porcentajes en grano corresponden a 58, 74, 18, 1.9, 26, 21, 9, 54, 22 del total absorbido de N, P₂O₅, K₂O, Ca, Mg, Cu, Mn, Zn y B, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántar G. G. y M. Sandoval V. (1999) Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo e Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 156 p.
- Alimuddin S., Y. Muşa, M. Azrai and L. Asrul (2020) Effect of boron on flowering, yield components and grain yield of two prolific maize (*Zea mays* L.) hybrids. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 484:012076, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012076>
- Andrade A. C., D. M. Da Fonseca, D. S. Queiroz, L. T. Salgado e P. R. Cecon (2003) Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). *Ciência e Agrotecnologia*. 27(Supl.):1643-1651.
- Bender R. R., J. W. Haegele, M. L. Ruffo and F. E. Below (2013) Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agronomy Journal* 105:161-170, <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352>
- Cakmak I. and A. M. Yazici (2010) Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops* 94:23-25.
- Cao Y., Z. He, T. Zhu and F. Zhao (2021) Organic-C quality as a key driver of microbial nitrogen immobilization in soil: a meta-analysis. *Geoderma* 383:114784, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114784>
- Ciampitti I. A. and T. J. Vyn (2012) Physiological perspectives of changes

- over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. *Field Crops Research* 133:48-67, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>
- Ciampitti I. A. and T. J. Vyn (2014) Understanding global and historical nutrient use efficiencies for closing maize yield gaps. *Agronomy Journal* 106:2107-2117, <https://doi.org/10.2134/agronj14.0025>
- de Resende A. V., A. E. F. Netto, V. M. C. Alves, J. A. Muniz, N. Curi, V. Faquin, ... e L. F. Carneiro (2006) Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30:453-466, <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000300007>
- de Resende V. A., C. G. M. Silva, A. Martínez G., E. P. Simão, L. J. M. Guimarães, S. G. Moreira e E. Borghi (2016) Indicadores de demanda de macro e micronutrientes por híbridos modernos de milho. Circular Técnica 220. Embrapa. Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. 9 p, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15277.08169>
- Dobermann A. (2005) Procedure for measuring dry matter, nutrient uptake, yield and components of yield in maize. Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska. Lincoln, Nebraska, USA. 11 p. <https://www.researchgate.net/file/PostFileLoader.html?id=56a89ca57eddd3b3618b45aa&assetKey=AS%3A322455225208832%401453890724796> (May 2022).
- du Jardin P. (2015) Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196:3-14, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Fernández V., T. Sotiropoulos y P. Brown (2015) Fertilización Foliar: Principios Científicos y Práctica de Campo. Traducido del francés por R. Melgar. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes. Paris, Francia. 156 p.
- Heckman J. R., J. T. Sims, D. B. Beegle, F. J. Coale, S. J. Herbert, T. W. Bruulsema and W. J. Bamka (2003) Nutrient removal by corn grain harvest. *Agronomy Journal* 95:587-591, <https://doi.org/10.2134/agronj2003.5870>
- Lorenz A. J., T. J. Gustafson, J. G. Coors and N. de Leon (2010) Breeding maize for a bioeconomy: a literature survey examining harvest index and stover yield and their relationship to grain yield. *Crop Science* 50:1-12, <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.02.0086>
- Martínez G. A., A. V. de Resende, C. G. M. Silva, D. C. Martins, E. P. Simão, S. G. Moreira and J. P. C. Ferreira (2018) Uptake and exportation of micronutrients by transgenic cultivars of maize under no-tillage in the Brazilian Cerrado. *Journal of Agricultural Science* 10:304-314, <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p304>
- 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>
- NASA, National Aeronautics and Space Administration (2022) The global precipitation measurement mission (GPM). Washington, D. C., USA. <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM> (March 2022)
- Parrado J., J. Bautista, E. J. Romero, A. M. García-Martínez, V. Friaiza and M. Tejada (2008) Production of a carob enzymatic extract: potential use as a biofertilizer. *Bioresource Technology* 99:2312-2318, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.029>
- Printz B., S. Lutts, J. F. Hausman and K. Sergeant (2016) Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics. *Frontiers in Plant Science* 7:601, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00601>
- Quezada J. C., A. W. Lenssen, K. J. Moore, J. E. Sawyer and P. Summer (2015) Amino acid biosynthesis byproducts are a suitable source of nitrogen for corn production. *Field Crops Research* 184:123-132, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.014>
- SAS Institute (2022) The SAS System for Windows User's Guide. Release 9.4. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. 35 p.
- Setiyono T. D., D. T. Walters, K. G. Cassman, C. Witt and A. Dobermann (2010) Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118:158-168, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022) Balanza disponibilidad-consumo maíz. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/622613/Balanza_disponibilidad-consumo_6.pdf (Mayo 2022).
- Silva C. G. M., A. V. de Resende, A. Martínez G., S. G. Moreira, E. Borghi and G. O. Almeida (2018) Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization investment. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 53:1363-1372, <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200009>
- Suman M., P. D. Sangma and D. Singh (2017) Role of micronutrients (Fe, Zn, B, Cu, Mg, Mn and Mo) in fruit crops. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6:3240-3250, <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.606.382>
- Tejada M., B. Rodríguez-Morgado, P. Paneque and J. Parrado (2018) Effects of foliar fertilization of a biostimulant obtained from chicken feathers on maize yield. *European Journal of Agronomy* 96:54-59, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.003>
- Zamudio-González B., M. Tadeo-Robledo, A. Espinosa-Calderón, J. N. Martínez R., D. I. Celis E., R. Valdivia B. y J. Zaragoza E. (2015) Eficiencia agronómica de fertilización al suelo de macro nutrientes en híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6:1557-1569, <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.549>
- Zamudio-González B., M. Tadeo-Robledo, A. Espinosa-Calderón, N. Martínez-Rodríguez y A. Turrent-Fernández (2016) Índice de cosecha con macronutrientes en grano de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:1077-1089, <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.233>