

Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes

Aarón Martínez-Gutiérrez¹
Benjamín Zamudio-González^{2§}
Margarita Tadeo-Robledo³
Alejandro Espinosa-Calderón²
João Carlos Cardoso-Galvão⁴
María Gricelda Vázquez-Carrillo²

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno s/n, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. CP. 71230. ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250. ³Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM. ⁴Universidad Federal de Vicosa-Campus Vicosa. Avenida Peter Henry Rolfs, Vicosa, Minas Gerais, Brasil.

§Autor para correspondencia: bzamudiog@yahoo.com.mx.

Resumen

El uso de bioestimulantes ha sido una estrategia agrícola para aumento del rendimiento y la calidad de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de bioestimulantes en el rendimiento y en los componentes de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) en Valles Altos del Estado de México. La siembra se realizó durante el ciclo primavera verano 2017 en tres ambientes (Jocotitlán, Temascalcingo, Jilotepec). Se evaluaron once híbridos de maíz (TSIRI PUMA; ATZIRI PUMA; TLAOLI PUMA; IXIM PUMA, H-50, #46#48; H-66; H-76; H-77; H-47AE y H-49AE). Los tratamientos foliares con bioestimulantes fueron los siguientes: B1= testigo; B2= Eurobor; B3= Eurologo; B4= Eurodual; B5= Euroalg. Las evaluaciones incluyeron: rendimiento de grano, producción de paja, hileras por mazorca, granos por hilera, granos por mazorca, peso volumétrico, peso de 200 granos y diámetro de mazorca. Para todas las variables se realizó un análisis de varianza combinado y se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey) y análisis de correlación (Pearson). Entre los ambientes, híbridos y en los bioestimulantes hubo diferencias significativas. En Temascalcingo se observó mayor rendimiento de grano con 13.5 t ha⁻¹. Los híbridos presentaron rendimientos superiores a estudios reportados en la literatura, y destacan los genotipos H-66, H-50 y H-76 en el presente estudio. Los bioestimulantes aumentaron el rendimiento de grano de 7.9 a 11.4%, respecto al testigo, y afectó positivamente los componentes agronómicos de los híbridos evaluados. Los bioestimulantes resultan una alternativa en la fertilización complementaria para incremento de producción en el cultivo de maíz.

Palabras claves: *Zea mays* L, agricultura sustentable, alta productividad, nutrición mineral.

Recibido: enero de 2022

Aceptado: marzo de 2022

Introducción

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en los Valles Altos de México (2 200 a 2 600 msnm) lo producen pequeños y medianos productores que no cuentan con recursos económicos y tecnologías adecuadas en la conducción de su cultivo, esto limita alcanzar potenciales máximos de rendimiento del grano. A pesar de que ya se cuentan con materiales mejoradas con estabilidad de rendimiento (Vázquez *et al.*, 2020), la falta de innovaciones agrícolas en el manejo agronómico del maíz contribuye a su baja productividad, además de las condiciones edafoclimáticas adversas en los ambientes contrastantes reduce significativamente la producción (Turrent *et al.*, 2016).

Lo anterior, habrá que considerar acciones de ajustes en los paquetes tecnológicos, manejo agronómico y programas de fitomejoramiento que permitan al productor seleccionar su semilla y adoptar las mejores prácticas agrícolas como el manejo eficiente de la fertilización química y orgánica, prácticas finas de nutrición foliar al follaje (Fernández *et al.*, 2015; Zamudio *et al.*, 2018) y otras innovaciones tecnológicas que proporcionan respuestas en los componentes agronómicos del cultivo.

En los últimos años, el uso de bioestimulantes, ha sido una estrategia dentro del programa de fertilización como complemento a la fertilización aplicada al suelo (Zamudio *et al.*, 2018). Los estudios sobre los efectos de bioestimulantes se han intensificado en diferentes cultivos (Du Jardin, 2015), aunque la mayor parte de la investigación se reporta en cultivos hortícolas y bajo condiciones de invernaderos (Grabowska *et al.*, 2012; Mattner *et al.*, 2013; Petrozza *et al.*, 2013), con pocos estudios asociados al cultivo de maíz (Quezada *et al.*, 2015; Tejada *et al.*, 2018; Zamudio *et al.*, 2018).

Según Calvo *et al.* (2014) Los bioestimulantes pueden ser sintéticos o naturales y están compuestos por sustancias como hormonas vegetales, macro y micronutrientes, aminoácidos, proteínas y microorganismos, por lo cual se pueden definir por su composición y modo de acción, por su impacto en la planta (Yakhin *et al.*, 2017), por las funciones que ejercen en las plantas, o por la respuesta final sobre el rendimiento del cultivo (Du Jardín, 2015). Estos compuestos afectan la fisiología de la planta cuando se aplican en cantidades pequeñas. Du Jardin (2015) clasificó los bioestimulantes en tres grupos principales: extractos de algas, proteínas hidrolizadas (péptidos y aminoácidos libres (AL)) y sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos).

De acuerdo con Battacharyya *et al.* (2015) los extractos de algas son una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos de la biomasa de algas marinas que contienen material de origen carbohidratos (manitol), minerales, osmolitos (betaínas), metabolitos secundarios (ej. fenoles), aminoácidos, vitaminas y hormonas de crecimiento vegetal. Los extractos de algas presentan resistencia alta al estrés osmótico, reducción en la degradación de las proteínas, evitando la oxidación de los cloroplastos y un retraso en la senescencia foliar que prolonga la actividad fotosintética de la planta (Jannin *et al.*, 2013). Además, al funcionar como quelatos de iones metálicos, mejora la absorción de los nutrientes, cuando se aplican en condiciones de crecimiento subóptimas o bajo estrés ambiental (Crouch y Van Staden, 1994).

La síntesis industrial de aminoácidos incluye hidrólisis química, enzimática o ambas, de subproductos agroindustriales de origen animal o vegetal y de biomasa de cultivos específicos (Cavani *et al.*, 2006). Según Rai (2002) los procesos fisiológicos en las plantas son reguladas por

aminoácidos libres de cadena corta. Los aminoácidos pueden actuar como agentes antiestrés (Mladenova *et al.*, 1998), fuente de nitrógeno y precursores de hormonas (Rai, 2002; Zhao, 2010; Maeda y Dudareva, 2012) como aditivos con insecticidas y fungicidas (Cavani *et al.*, 2006) y como agentes quelatantes (Ashmead, 1986). La aplicación de cualquier nutriente junto con aminoácidos resulta más efectiva durante el proceso de su asimilación e incorporación en los tejidos vegetales de la planta. Los nutrientes quelados con aminoácidos forman moléculas muy pequeñas, eléctricamente neutras, que aceleran su absorción y transporte dentro de la planta (Ashmead, 1986).

La absorción de aminoácidos por las plantas tiene ventaja energética al evitar los procesos de transformación química de los nutrientes en sus diferentes formas de asimilación. Los aminoácidos son absorbidos y asimilados por la planta, incorporándose rápido al metabolismo vegetal, como si fueran sintetizadas por las mismas sin gasto energético (Jones y Kielland, 2002). En este sentido, mejora la nutrición de los cultivos, en especial en las etapas críticas del desarrollo de la planta, exhibe mayor rendimiento y mejora la calidad de grano o fruto cosechado (Parrado *et al.*, 2008; Tejada *et al.*, 2016). En la aplicación de bioestimulantes se espera que las plantas presenten óptimo desarrollo y presenten mejores características y rendimiento de grano al final del ciclo productivo.

A pesar de que en otros países se llevan a cabo trabajos de investigación en el cultivo de maíz para observar la respuesta de rendimiento en función de la aplicación de bioestimulantes (Quezada *et al.*, 2005; Gazola *et al.*, 2014; Galindo *et al.*, 2015) en México no existe información respecto a la fertilización foliar de bioestimulantes (aminoácidos y extractos de algas marinas) para el cultivo de maíz, que compruebe su eficiencia en las características agronómicas del cultivo. En este contexto, la hipótesis fue que en la aplicación foliar de los bioestimulantes impactará de manera diferencial la respuesta genética de la semilla de maíz en un mayor rendimiento de grano y mejores respuestas en las características agronómicas al favorecer la síntesis y asimilación de los fotosintatos. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la fertilización foliar de bioestimulantes a base de aminoácidos y extractos de algas marinas en el rendimiento y en las características agronómicas de híbridos de maíz en Valles Altos del Estado de México.

Materiales y métodos

Los experimentos se establecieron en tres ambientes de Valles Altos del Estado de México en el ciclo agrícola primavera-verano (PV), 2017. El primer experimento se realizó en Jocotitlán (JOC) (19° 43' latitud norte, 99° 51' longitud oeste y 2 700 msnm), con precipitación media anual de 669 mm y temperatura oscila entre 3 y 24 °C y la siembra se realizó el 10 de abril, el segundo experimento se ubicó en Temascalcingo (TEM) (19° 55' latitud norte, 100° 00' longitud oeste, 2350 msnm), con precipitación media anual de 874.6 mm y 10.6 y 23 °C. La siembra se hizo el 22 de abril y el tercer experimento correspondió a Jilotepec (JIL) (19° 59' latitud norte, 99°30' longitud oeste y 2 500 msnm) con precipitación media anual de 850 mm y la temperatura varían de 8 °C y 24 °C, la siembra se realizó el 20 de mayo de 2017. En las tres áreas experimentales los suelos se clasifican como Phaeozem fase color oscura (Feozem háplico (Jocotitlán), Feozem lúvico (Temascalcingo) y Feozem gléyico (Jilotepec), de textura franco-arcillosa (30, 38, 32% de arcilla, limo y arena respectivamente) (Sotelo *et al.*, 2011). Se realizó análisis de suelo en los tres ambientes para determinar las características químicas del mismo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características químicas del suelo en tres ambientes de producción para el cultivo de maíz, en profundidades de 0 a 20 cm. Ciclo agrícola, primavera-verano, 2017.

Ambiente	pH	MO	N-NO ₃	P ¹	K	S	Ca	Mg	Al ³⁺	H+Al	CIC	V ²	m ³
	Agua	(%)	(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	1.9	15.9	72.2	350	2.8	6.64	3.24	0	0	11	95	0
Jilotepec	6.8	2.8	28	137	420	7	14.8	6.52	0	0	22.7	98	0

¹= método de Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945); ²= saturación de base; ³= saturación de aluminio; CIC= capacidad de intercambio catiónico; macronutrientes (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; Jilotepec: B= 0.28; Cu= 2.74; Fe= 45.6; Mn= 35.3; Zn= 2.28.

Se valoraron once híbridos de grano blanco, cuatro liberados por la UNAM (TSIRI PUMA; ATZIRI PUMA; TLAOLI PUMA; IXIM PUMA) y siete liberados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (H-50, #46#48; H-66; H-76; H-77; H-47AE; H-49AE), estos dos últimos y los cuatro de la UNAM, son híbridos trilineales generados con progenitores ‘androestéril’. La densidad de siembra fue de 85 000 plantas ha⁻¹, cada parcela experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m por 8 m de longitud y se consideró como parcela útil las dos líneas centrales (4.8 m²).

Previo a la siembra las semillas fueron tratadas con Crusier[®] (tiametoxam 50 ml ha⁻¹) e insecticida Force[®] (10 teflutrina 15 kg ha⁻¹) para control de plagas del suelo. La dosis de fertilización fue de 250-60-60 kg ha⁻¹ de N- P- K y la aplicación se realizó en tres momentos. En la siembra se aplicó 60 kg ha⁻¹ de N, 100% del fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O) a razón de 60 kg ha⁻¹ para ambos casos, a base de urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, respectivamente. La segunda y tercera aplicación se utilizó urea con 120 kg ha⁻¹ de N entre V₄-V₆ y 70 kg ha⁻¹ de N entre V₁₀-V₁₂, respectivamente.

La maleza se controló en etapa inicial vegetativa (V₂-V₄) de forma mecánica con la escarda y posteriormente se aplicó herbicida Lumax[®] (S-metolaclo, atrazina y mesotrione 4 L ha⁻¹). Para el control de insectos del follaje se aplicó Karate Zeon[®] (Lambda cihalotrin 250 ml ha⁻¹) y Denim[®] (benzoato de emamectina 100 ml ha⁻¹). Para la prevención de enfermedades se aplicó Priori[®] Xtra (azoxistrobina, ciproconazol 350 ml ha⁻¹). Los bioestimulantes fueron aplicados de forma foliar con uso de mochila aspersora en dos etapas fenológicas del cultivo, entre V₅-V₆ y V₈-V₁₀, respectivamente. Las aplicaciones foliares fueron realizadas en las primeras horas de la mañana (07:00 a 09:00 am). La composición química de los bioestimulantes (aminoácidos y extractos de algas marinas) de cada tratamiento foliar se presentan en el Cuadro 2.

Una vez alcanzada la madurez fisiológica (R₆) se realizó la cosecha para cuantificar el rendimiento (REN) (t ha⁻¹) con el peso seco del grano, ajustado a 14% de humedad y extrapolado por hectárea (Tadeo *et al.*, 2015). Además, se registraron las siguientes componentes agronómicas: producción de paja (PP) (t ha⁻¹), peso de 200 g (P200) (g), hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), número granos por mazorca (NGM), diámetro de mazorca (mm) (DM) y peso volumétrico del grano (PV) (kg hl⁻¹).

Cuadro 2. Composición química de los bioestimulantes y dosis aplicadas en las plantas de maíz en tres ambientes del Estado de México.

Bioestimulantes	Composición química	Dosis (kg ha ⁻¹)
Testigo (B1)	Sólo agua (test)	0
Eurobor (B2)	5% de N orgánico (NO), 25% de aminoácidos libres (AL) y 3% boro	2.5
Eurologo (B3)	5% NO, 25% AL y M (Zn 1%, Mn 0.5%, Fe 0.5%, B 0.1%, Mo 0.01%)	2.5
Eurodual (B4)	3% NO, 10% de carbono orgánico (CO), 15% AL, 8% de CaO y 2% de MgO	2.5
Euroalg (B5)	10% CO, 1% NO, pH 8.9, sustancia orgánica con peso molecular <50 kDa (KiloDaltons) 30%, extracto concentrado de alga <i>A. nodosum</i> y extractos de levadura (sustancia seca: 37%), macro y micronutrientes	3

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones, en arreglo factorial de 3×5×11 y ambientes (A), bioestimulantes (B), híbridos (H) y sus interacciones, como fuentes de variación. Para determinar los efectos simples e interacciones del diseño de tratamientos con relación a las variables respuesta se realizó un análisis de varianza combinado con el programa estadístico SAS versión 9.4 (SAS, 2002). La comparación de medias fue con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) y un análisis de correlación (Pearson).

Resultados y discusión

Las diferencias en el rendimiento de grano y los componentes del rendimiento debidas al ambiente (A) fueron significativas ($p \leq 0.01$), excepto HM y DM. Entre los híbridos (H) presentó diferencia altamente significativa ($p \leq 0.01$) en todas las variables. En el factor bioestimulantes (B) se identificaron dos grupos de significancias en REN, PV, NGM y P200 ($p \leq 0.01$) y en HM y GH ($p \leq 0.05$). En la interacción A*H tuvo efecto significativo en todas las variables ($p \leq 0.01$); en la interacción A*B en REN, PP, HM, GH, NGM y P200 hubo significancia ($p \leq 0.05$); en la interacción H*B en REN, PV, PP, NGM y P200, y en la interacción A*H*B en REN, PP, P200 y HM hubo alta significancia ($p \leq 0.01$). (Cuadro 3).

En las interacciones (A*H, A*B, H*B y A*H*B) hubo diferencias significativas para rendimiento de grano, lo que significa que los híbridos evaluados presentan comportamiento diferencial en rendimiento tanto para el factor ambiente como para los bioestimulantes, y al menos tres bioestimulantes (B2, B3 y B4) presentaron respuesta positiva en los tres ambientes (Cuadro 3). En cuanto al coeficiente de variación para rendimiento de grano fue de 6.4% lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados estadístico.

El rendimiento promedio final fue de 12.3 t ha⁻¹, superior a la media de la región de 6 t ha⁻¹ (Tadeo *et al.*, 2015). Los rendimientos en promedio por ambientes, la mayor producción con 13.5 t ha⁻¹ correspondió a Temascalcingo, en contraste en Jilotepec presentó rendimiento menor con 10.2 t ha⁻¹. El rendimiento de grano en Jilotepec se redujo 24.5% (3.3 t ha⁻¹) con respecto a Temascalcingo, debido al retraso en la siembra que propició menor número de días para completar el ciclo y probablemente afectó el rendimiento del grano en función de las condiciones desfavorables del clima, como son mala distribución de las lluvias, temperaturas bajas y heladas.

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado para rendimiento de grano y componentes de rendimiento de once híbridos de maíz de grano blanco en función a la fertilización foliar con bioestimulantes en tres ambientes de Valles Altos del Estado de México. Ciclo agrícola, primavera-verano, 2017.

FV	GL	REN (t ha ⁻¹)	PV (kg hl ⁻¹)	PP (t ha ⁻¹)	HM (núm.)	GH (núm.)	NGM (núm.)	P200 (g)	DM (mm)
A	2	686.1**	505**	995.4**	0.47 ns	554.1**	134278.2**	1117.3**	14.9 ns
Bloq (A)	9	0.56 ns	1 ns	8.6 ns	0.61 ns	13.9 ns	5934.4 ns	2**	5.9 ns
H	10	11.6**	46.84**	19.8**	23.3**	49.6**	23521.4**	351.2**	52.7**
B	4	34.2**	10.6**	12.6 ns	7*	43.5*	33532.9**	77.5**	16.9**
A×H	20	19.9**	34.1**	45.9**	10**	48.5**	21652.9**	198.6**	47.3**
A×B	8	9.1*	0.33 ns	20.9*	4.65*	18.9*	9854.5*	53*	4.2 ns
H×B	40	1.9**	1.84**	16.7**	2.2 ns	12.9 ns	6475.5*	18.6**	7.2 ns
A×H×B	80	2**	1.12 ns	10.9*	3.05**	12.2 ns	5568.1 ns	18.1**	6.4 ns
Error	486	0.6	0.92	7.74	1.8	10.3	4550.5	7.3	6.4
Total	659	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	6.4	1.2	18.5	8.4	10.5	13.5	4.1	5.2
Media	-	12.3	80.2	15.08	16.4	30.5	499.5	65.8	48.3

ns= no significativo; * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$. Bloq= bloque; A= ambiente; H= híbrido; B= bioestimulante; FV= fuente de variación; CV= coeficiente de variación; GL= grados de libertad; REN= rendimiento de grano; PV= peso volumétrico; PP= producción de paja; HM= hileras por mazorca; GH= granos por hilera; NGM= número de granos por mazorca; P200= peso de 200 granos; DM= diámetro de mazorca.

En Jocotitlán y Temascalcingo se observó una diferencia de 0.5 t ha⁻¹ lo que puede estar influenciado por la fecha de siembra cercana una de la otra. Tadeo *et al.* (2015) evaluaron cuatro genotipos de maíz en diferentes fechas de siembra (17 de mayo; 1 de junio) en Cuautitlán Izcalli (2 240 msnm) y verificaron que la siembra realizada el 17 de mayo presentó mayor rendimiento de grano en relación con la segunda siembra. Por lo tanto, a medida que se retrasa la siembra del maíz en Valles Altos, es afectado por la distribución irregular de las lluvias, reducción de la radiación solar y las bajas temperaturas (heladas) durante el ciclo, reduciendo así el potencial productivo del cultivo.

En relación con los híbridos, estos presentaron diferencia altamente significativa en todas las variables agronómicas evaluadas (Cuadro 4) lo cual indica que los genotipos utilizados presentan una gran diversidad fenotípica. El rendimiento de los híbridos varió de 11.5 (Tsiri Puma) a 13 (H-66) t ha⁻¹ con un rendimiento promedio de 12.3 t ha⁻¹ de grano. Se destacan los híbridos H-66, H-50 y H-76 con rendimiento promedio de 13, 12.6 y 12.5 t ha⁻¹, respectivamente. Los híbridos Tsiri Puma (11.5 t ha⁻¹) y Atziri Puma (11.7 t ha⁻¹) tuvieron rendimientos relativamente bajos en este estudio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de medias de rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) de once híbridos de maíz en función a tratamientos foliares con bioestimulantes. Media de tres ambientes de Valles Altos de México. Ciclo agrícola, primavera-verano, 2017.

Híbrido	Bioestimulantes foliares				
	B1	B2	B3	B4	B5
Tsiri Puma	10.9 bcdB	12 bA	11.9 cA	11.7 cAB	10.9 dB
Atziri Puma	10.9 bcdB	11.9 abA	12.2 bcA	12 bcA	11.7 cdAB
Tlaoli Puma	11.5 abcC	12.8 abA	11.9 cBC	12.6 abcAB	11.9 bcdABC
Ixim Puma	11.6 abcC	11.9 bBC	13.1 abA	12.6 abcAB	12.7 bcAB
H-47 AE	11.2 abcdB	13 aA	13.2 abA	12.9 abA	11.9 bcdB
H-49 AE	10.7 dB	12.4 abA	12.7 abcA	11.8 cA	12.3 bcA
H-50	11.2 abcdC	12.5 abB	13 abAB	13.4 aA	12.9 abAB
H-66	12 aC	12.9 aB	13.2 abAB	13 abB	13.9 aA
H-76	11.9 abC	12.4 abABC	13.3 aA	12.2 bcBC	12.9 abAB
H-77	11.5 abcB	12 abAB	12.6 abcA	12.2 bcAB	12 bcAB
#46#48	11.9 abB	13 aA	12.9 abcA	13 abA	12 bcB
M ^f B	11.4 C	12.4 B	12.7 A	12.5 B	12.3 B
CV (%)	6.4				

Medias con la misma letra minúscula en la columna (híbridos) y mayúscula en la hilera (bioestimulantes) son estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$). CV= coeficiente de variación; M^f= medias; B= bioestimulantes; B1= testigo; B2= Eurobor; B3= Eurologo; B4= Eurodual; B5= Euroalg.

Los resultados de este estudio superan el promedio de rendimiento de la región y los reportados en otros trabajos (Martínez *et al.*, 2018; Tadeo *et al.*, 2020; Vázquez *et al.*, 2020), en los cuales los rendimientos fueron relativamente bajos para estos mismos híbridos. Lo anterior, se debió a la fertilización foliar con bioestimulantes que impacta directamente en un aumento significativo en el rendimiento del grano (Quezada *et al.*, 2015; Tejeda *et al.*, 2018; Zamudio *et al.*, 2018). No obstante, todavía es pertinente el estudio continuo de la fertilización foliar de bioestimulantes en el cultivo de maíz, a fin de conocer los mecanismos de acción de éstos y la respuesta morfológica y fisiológica de las plantas en los diferentes híbridos y en función a los ambientes contrastantes.

Respecto a los bioestimulantes, en las localidades de Temascalcingo y Jilotepec las respuestas se observaron con la aplicación foliar de B2 y B3. En ambas localidades hay suelos ligeramente alcalinos con $pH \geq 6.8$ (Cuadro 1). En contraste, en Jocotitlán se caracteriza con suelos de pH de 5.6, (Cuadro 1), permitió que la fertilización foliar con bioestimulante (B4) superara los demás tratamientos foliares, que contiene en su composición 8 y 2% de %CaO y MgO, respectivamente (Cuadro 2). En estos suelos que tienen características como pH bajo o alto, presencia de minerales escasamente disponibles, las plantas carecen de niveles óptimos de nutrientes esenciales, particularmente micronutrientes, que podrían ser aportados por fertilización foliar.

La absorción por partes aéreas constituye el único medio práctico para suministrar nutrientes específicos. La disponibilidad de micronutrientes en el suelo está estrechamente relacionada con su solubilidad, debido al hecho de que el tejido de la hoja y de la raíz tienen la misma estructura

morfológica (se originan en el tejido del meristemo), las plantas pueden absorber rápidamente los minerales disueltos (Martinka *et al.*, 2014). Por lo tanto, la deficiencia de micronutrientes en los suelos puede manejarse con éxito mediante fertilización foliar (Barbosa *et al.*, 2013; Tejada *et al.*, 2018). Los efectos de los bioestimulantes foliares fueron favorecidas durante la aplicación en los tres ambientes por las bajas temperaturas, humedad relativa más alta, cuya combinación de ambos factores implica un menor déficit de presión de vapor (Fernández *et al.*, 2015) y a la vez está asociado en la apertura estomático, que permitió mayor eficiencia en la absorción de los bioestimulantes foliares.

En los componentes del maíz los bioestimulantes produjeron efectos estadísticamente diferentes, excepto para producción de paja (Cuadro 4). Con relación al testigo (B1) para cada bioestimulante se detectó incremento en el rendimiento de grano de maíz de 11.4, 9.6, 8.8 y 7.9% para B3, B4, B2, B5, respectivamente (Cuadro 4). En un estudio de fertilización foliar con bioestimulante a base de aminoácidos libres provenientes de tejido epitelial de pollo, en promedio de dos ciclos agrícolas, Tejada *et al.* (2018) observaron incremento de un 14% del rendimiento de grano de maíz. Ahmad *et al.* (2007), en un estudio de campo con compost enriquecido con N y con triptófano al suelo, observaron incremento en 21% de rendimiento de grano de maíz.

En contraste, Quezada *et al.* (2015), No observaron aumento rendimiento de grano en la fertilización al suelo de subproducto de biosíntesis de triptófano y lisina, pero si detectaron diferencia significativa para índice de cosecha (IC) en relación con el testigo, por lo que sugieren que existe potencial en los aminoácidos como fuentes de N en complemento a la fertilización nitrogenada (nitrato y sulfato de amonio) para incrementar los rendimientos de grano.

En promedio de los once híbridos, la mejor respuesta se observó en B3 con un aumento de 11.4 % en el rendimiento, lo que representa 1.3 t ha⁻¹ de grano de maíz (Cuadro 4) comparado con el B1, seguidos por B4, B2 y B5. El B3, además de aminoácidos libres, contienen micronutrientes (en porcentaje Zn 1, Mn 0.5, Fe 0.5, B 0.1, Mo 0.01) de asimilación fácil para las plantas debido al efecto quelatante de los aminoácidos sobre los micronutrientes (Cu, Mn, Zn y B) dentro de la planta, que facilita su absorción y transporte cuando se aplican juntos, también afectan positivamente la permeabilidad de la membrana celular (Ibrahim *et al.*, 2010), además están particularmente involucrados en la fase reproductiva de la planta y por lo tanto, en la determinación del rendimiento y la calidad del cultivo cosechado (Parrado *et al.*, 2008; Tejada *et al.*, 2018).

Los bioestimulantes a base de aminoácidos combinado con micronutrientes esenciales como el Zn y B representan una alternativa para los suelos de Valles Altos debido a las bajas concentraciones de estos micronutrientes para estos agroecosistemas (Cuadro 1). Se observa que al aplicar B2 que contiene 3% de boro supera al testigo (B1), con 8.8% de rendimiento de grano que representa 1.1 t ha⁻¹ de producción de grano de maíz. La presencia de estos nutrientes en los bioestimulantes permite subsanar su carencia en los suelos, optimizando las actividades vegetativas y reproductivas a las plantas. Los micronutrientes una vez asimilado por las plantas e incorporados en los tejidos vegetales son eficazmente transportados por los complejos de aminoácidos, y afectan el rendimiento del grano (Ashmead, 1986).

El B5 que presenta en su composición extractos de algas marinas, presentó un aumento de 7.9% en rendimiento de grano respecto al testigo y presentó respuesta similar con el B2 y B4 de este estudio. Aunque se desconoce el mecanismo de acción del extracto de algas marinas para mejorar

la productividad de los cultivos agrícolas (Mohanty *et al.*, 2013), se han observado respuestas positivas en el rendimiento de grano con fertilización foliar de bioestimulante a base de extractos de algas marinas como complemento a la fertilización al suelo. Galindo *et al.* (2015) observaron aumento en el rendimiento de grano de maíz con extracto de *Egeria densa*, respecto al relación al testigo de 8 y 6.2%, en una única aplicación (VT) y en dos aplicaciones (VT y R2), respectivamente. Kumar y Sahoo (2011) reportaron mayor rendimiento en *Triticum aestivum* en la aplicación foliar de 20% de extracto de *Sargassum wightii*, con aumento de 13.69% en número de semillas y un aumento de 22.86% en el peso seco de las semillas respecto al testigo.

En este estudio, el B5, además de su composición (10% carbono orgánico y 1% de nitrógeno orgánico), contiene los materiales de origen una fuente rica en minerales, vitaminas, carbohidratos y promotores de crecimiento, que sería una alternativa para su uso como fertilizante foliar orgánico, ya que impacta en el rendimiento (Cuadro 4). Las variables agronómicas evaluadas en este estudio presentaron diferencias significativas para el factor bioestimulante, excepto producción de paja que no varió entre los tratamientos (Cuadro 5). Lo anterior, se le atribuye por el alto porcentaje de CV medidos para producción de paja (18.5%), en comparación con las otras variables que oscilaron de 1.2 a 13.5% (Cuadro 3), valores aceptables de la variabilidad experimental.

Cuadro 5. Comparación de medias de ocho variables en función a cinco tratamientos foliares con bioestimulantes. Promedio de ambientes e híbridos en Valles Altos de México. Ciclo agrícola, primavera-verano, 2017.

Bioestimulantes foliares	Variables agronómicas							
	REN (t ha ⁻¹)	PV (kg hl ⁻¹)	PP (t ha ⁻¹)	HM (núm.)	GH (núm.)	NGM (núm.)	P200 (g)	DM (mm)
B1	11.4 c	79.9 b	14.6 a	16 b	29.7 b	473 c	64.8 c	47.7 c
B2	12.4 bc	80.6 a	15.5 a	16.5 ab	30.5 ab	502 bc	66.9 a	48.9 a
B3	12.7 a	80.3 ab	14.9 a	16.4 ab	31 a	507 ab	65.5 ab	48.2 ab
B4	12.5 ab	80 b	15.3 a	16.5 ab	30.4 ab	499 bc	66 ab	48.4 ab
B5	12.3 bc	80 b	14.7 a	16.6 a	31.1 a	516 a	65.7 ab	48.1 ab

Medias con letra diferente en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$). REN= rendimiento de grano; PV= peso volumétrico; PP= producción de paja; HM= hilera por mazorca; GH= granos por hilera; NGM= número de granos por mazorca; P200= peso de 200 granos; DM= diámetro de mazorca. B1= testigo; B2= Eurobor; B3= Eurologo; B4= Eurodual; B5= Euroalg.

Se destaca el B2 que impactó en mayor densidad del grano de maíz (80.6 kg hl⁻¹), hileras por mazorca (16.5), peso de 200 granos (66.9 g) y diámetro de mazorca (48.9 mm) seguidos por B3, B4, B5, respectivamente comparado con el testigo (B1). Esta respuesta de B2 probablemente se debe por la presencia de 3% B que, entre otras funciones, participa en el desarrollo de frutos y semillas, responsable de transporte de azúcares, desarrollo de hormonas y división celular (Goldbach, 2001). En estudios pioneros sobre el efecto del boro en la formación de la mazorca y los componentes de rendimiento de grano de maíz, Mozafar (1987); Vaughan (1977) concluyen que, en la deficiencia de B, las estigmas se vuelven poco receptivas al polen, esto porque el B es inmóvil en el floema de la planta, lo que lleva en menor número de hileras y granos por hilera en la mazorca, por lo que se recomienda la aplicación de B para una mejor polinización y formación de granos, lo que es evidente en el presente estudio (Cuadro 5).

Las diferencias significativas para hileras por mazorca, granos por hilera y número de granos por mazorca en el factor bioestimulante evidencian consistencia de las tres variables, lo cual influyó en el rendimiento de grano tanto en el tratamiento con mayor rendimiento (B3) así como el testigo (B1) que presentó rendimiento menor. Se detectó una correlación positiva entre HM vs NGM ($r=61$) y GH vs NGM ($r=77$). Las hileras por mazorca, granos por hilera y número de granos por mazorca proporcionaron valores del orden de 16-16.6; 29.7-31.1; 473.3-515.6, respectivamente (Cuadro 5). Esta última variable, en promedio de los cuatro tratamientos con bioestimulantes (B2, B3, B4 y B5) representa un incremento de 6.9%, con relación al testigo (B1). Tejada *et al.* (2018) verificaron aumento de 8.9 hasta 15.8% número de granos por mazorca cuando aplicaron dosis creciente de bioestimulantes a base de aminoácidos, en dos ciclos agrícolas (Cuadro 5).

Los datos anteriores también superan los informados por Martínez *et al.* (2018); Zamudio *et al.* (2018); Tadeo *et al.* (2020); Vázquez *et al.* (2020) con híbridos adaptados para condiciones de ambiente similares a este estudio. Las respuestas positivas observadas en HM, GH y NGM se asocia con la calidad genética de la semilla de los híbridos, la fertilización foliar complementaria (Zamudio *et al.*, 2018) y la aplicación oportuna de nutrimento en épocas de mayor demanda. Los bioestimulantes foliares incidieron en el peso volumétrico al presentar granos muy densos que varían de 79.9 (B1) a 80.6 (B2) kg hl⁻¹ (Vázquez *et al.*, 2020), estos valores superan lo reportado por Zamudio *et al.* (2018) en trabajo con fertilización foliar con diferentes productos enriquecidos de material orgánico nitrogenados.

Así, se cumple con lo exigido por la industria de la masa y la tortilla (IMT) y de harina nixtamalizada (IHN) que demandan granos con un PV mayor a 74 kg hl⁻¹ (SE, 2002). Además, se observó mediante análisis de correlación de Pearson una estrecha correlación positiva entre PV y REN ($r=60$) lo cual permite deducir que los híbridos evaluados con manejos agronómicos eficientes como la fertilización foliar, específicamente con el uso de bioestimulantes pueden resultar aptos o favorables para la industria.

Se presentó diferencia significativa en peso de 200 granos entre los bioestimulantes y varió de 64.8 en B1 a 66.9 g en B2. El aumento en P200 se debió probablemente a la aplicación de los productos nitrogenados que mantuvieron la actividad fotosintética de la planta por un período más prolongado, permitiendo mayor acumulación de reservas en los granos y finalmente mayor peso de los granos cosechados. El resultado de este estudio corrobora lo informado por Gazola *et al.* (2014), sobre la correlación positiva entre la masa del grano y el rendimiento de maíz ($r=60$) (Cuadro 5).

El diámetro de mazorca presentó diferencias significativas para el factor bioestimulante (Cuadro 5) y varió de 47.7 (B1) a 48.9 (B2) mm, respectivamente. Al igual que las variables anteriores, los cuatro tratamientos superan al testigo (B1). Los valores de DM observados son similares a los reportados por Zamudio *et al.* (2018). El diámetro de mazorca está asociado con el factor genético de las semillas, el manejo agronómico y las condiciones ambientales que prevalece durante el ciclo. Los resultados de este estudio coinciden con los de Quezada *et al.* (2015); Galindo *et al.* (2015); Zamudio *et al.* (2018); Tejada *et al.* (2018) en el efecto de los bioestimulantes en plantas de maíz, que aumentaron significativamente el rendimiento de grano y las características agronómicas del cultivo.

Conclusiones

La aplicación de bioestimulantes en los momentos críticos de crecimiento y desarrollo de la planta favorece el potencial productivo de los híbridos evaluados para los ambientes de Valles Altos del Estado de México, sobre todo en condiciones de estrés osmótico. El ambiente con mejor respuesta corresponde a Temascalcingo, seguidos por Jocotitlán y Jilotepec. En promedio, se destacan los híbridos H-66, H-50 y H-76, sin embargo, todos los genotipos superaron el promedio de rendimiento regional. En la aplicación de los bioestimulantes el rendimiento de grano incrementó del orden de 0.9 a 1.3 t ha⁻¹. Técnicamente las mejores respuestas se observaron en los bioestimulantes, B2, B3 y B4. Dentro del B2 los híbridos con mejores respuestas fueron Tlaoli Puma, H-47AE, H-66 y #46#48, para B3 (Ixim Puma, H-47AE, H-66, #46#48), en B4 (Tlaoli Puma, Ixim Puma, H-47 AE, H-50, H-66 y #46#48), y para el B5 en el H-66. La fácil asimilación por los complejos de los aminoácidos es responsable del aumento en el rendimiento de grano. En este sentido, los bioestimulantes foliares resulta una alternativa en la fertilización complementaria para incremento de producción en el cultivo de maíz.

Literatura citada

- Ahmad, R.; Khalid, A. H.; Arshad, M.; Zahir, A. and Mahmood, T. 2007. Effect of compost enriched with N and L-tryptophan on soil and maize. *Agron. Sustain. Dev.* 2(28):299-305.
- Ashmead, H. D. 1986. The absorption mechanism of amino acid chelates by plant cells. *In: Ashmead, H. D. Foliar feeding of plants with amino acid chelates.* Noyes publications, park ridge, NY. 219-235. pp
- Battacharyya, D.; Babgohari, M. Z.; Rathor, P. and Prithiviraj, B. 2015. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.* 1(196):39-48. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.012.
- Barbosa, R. H.; Tabaldi, L. A.; Miyazaki, F. R.; Pilecco, M.; Kassab, S. O. and Bigaton, D. 2013. Foliar copper uptake by maize plants: effects on growth and yield. *Ciência Rural.* 9(43):1561-1568.
- Bray, R. H. and Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59(1):39-45.
- Calvo, P.; Nelson, L. and Kloepper, J. W. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil.* 1-2(383):3-41.
- Cavani, L.; Ter-Halle, A.; Richard, C. and Ciavatta, C. 2006. Photosensitizing properties of protein hydrolysates-based fertilizers. *J. Agr. Food Chem.* 24(54):9160-9167.
- Crouch, I. J. and Van-Staden, J. 1994. Evidence for rooting factors in a seaweed concentrate prepared from *Ecklonia maxima*. *J. Plant Physiol.* 3(137):319-322.
- Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hortic.* 1(196):3-14. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021.
- Fernández, V.; Sotiropoulos, T. y Brown, P. 2015. Fertilización foliar: principios científicos y práctica de campo. Paris, Francia, Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA). 49-82 p
- Galindo, S. F.; Nogueira, M. L.; Bellote, J. L. M.; Gazola, R. N.; Alves, C. J. and Teixeira, F. M. C. M. 2015. Desempenho agrônomo de milho em função da aplicação de bioestimulantes à base de extrato de algas. *Tecnol. Ciên. Agropec.* 1(9):13-19.

- Gazola, D.; Zucareli, C.; Silva, S. R. and Fonseca, C. B. I. 2014. Aplicação foliar de aminoácidos e adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho safrinha. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 1(18):700-707.
- Goldbach, H. E.; YU, Q.; Wingender, R.; Schulz, M.; Wimmer, M.; Findeklee, P. and Baluska, R. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. 2001. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2(164):173-181.
- Grabowska, A.; Kunicki, E.; Sekara, A.; Kalisz, A. and Wojciechowska, R. 2012. The effect of cultivar and biostimulant treatment on the carrot yield and its quality. *Veg. Crops Res. Bull.* 1(77):37-48.
- Ibrahim, S. M. M.; Taha, L. S. and Farahat, M. M. 2010. Influence of foliar application of pepton on growth, flowering and chemical composition of *Helichrysum bracteatum* plants under different irrigation intervals. *Ozean J. Appl. Sci.* 3(1):143-155.
- Jannin, L.; Arkoun, M.; Etienne, P.; Laíné, P.; Goux, D.; Garnica, M.; Fuentes, M.; Francisco, S. S.; Baigorri, R. and Cruz, F. 2013. Brassica napus growth is promoted by *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. Seaweed extract: microarray analysis and physiological characterization of N, C, and S metabolisms *J. Plant Growth Regul.* 1(32):31-52.
- Jones, D. L. and Kielland, K. 2002. Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 2(34):209-219.
- Kumar, P. and Sahoo, D. 2011. Effect of seaweed liquid extract on the growth and yield of *Triticum aestivum* var. Pusa gold *J. Appl. Phycol.* 2(23):251-255.
- Maeda, H. and Dudareva, N. 2012. The shikimate pathway and aromatic amino acids biosynthesis in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 1(63):73-105. Doi: 10.1146/annurev-arplant-042811-105439.
- Martinka, M.; Vaculík, M. and Lux, A. 2014. Plant cell responses to cadmium and zinc. In *Applied plant cell biology: cellular tools and approaches for plant biotechnology, plant cell monographs*; Nick, P. and Opatrny, Z. (Ed.) Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 209-246 pp.
- Martínez, G. A.; Zamudio, G. B.; Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Cardoso, G. J.; Vázquez, C. G. y Turrent, F. A. 2018a. Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de valles Altos de México. *Rev. Mex. de Cienc. Agríc.* 7(9):1447-1458.
- Mattner, S. W.; Wite, D.; Riches, D. A.; Porter, I. J. and Arioli, T. 2013. The effect of kelp extract on seedling establishment of broccoli on contrasting soil types in southern Victoria, Australia. *Biol. Agric. Hortic.* 4(29):258-270.
- Mladenova, Y. I.; Maini, P.; Mallegni, C.; Goltsev, V.; Vladova, R. and Vinarova, K. 1998. Siapton-anamino-acid-based biostimulant reducing osmotic stress metabolic changes in maize. *Agro Food Ind. Hi-Tech.* 6(9):18-22.
- Mohanty, D.; Adhikary, S. P. and Chattopadhyay, G. N. 2013. Seaweed liquid fertilizer (slf) and its role in agriculture productivity. *Ecoscan. Special Issue.* (3):147-155.
- Mozafar, A. A. 1987. Effect of boron on ear formation and yield components of two maize (*Zea mays* L.) hybrids. A. Institute of plant sciences, swiss federal institute of technology (ETHZ), 8092, Zurich. 319-332 pp.
- Parrado, J.; Bautista, J.; Romero, E. J.; García-Martínez, A. M.; Friaza, V. and Tejada, M. 2008. Production of a carob enzymatic extract: potential use as a biofertilizer. *Biores. Technol.* 7(99):2312-2318.
- Petrozza, A.; Summerer, S.; Di-Tommaso, G.; Di-Tommaso, D. and Piaggese, A. 2013. Evaluation of the effect of Radifarm® treatment on the morpho-physiological characteristics of root systems via image analysis. *Acta Hort.* 1009(18):149-153.

- Quezada, J. C.; Lenssen, A. W.; Moore, K. J.; Sawyer, J. E. and Summer, P. 2015. Amino acid biosynthesis byproducts are a suitable source of nitrogen for corn production. *Field Crop. Res.* 1(184):123-132.
- Rai, V. K. 2002. Role of amino acids in plant responses to stresses. *Biol. Plant.* 4(45):481-487.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows user's guide. Release 9.4. SAS Institute, Cary, NC.
- Sotelo, R. E. D.; González, H. A.; Cruz, B. G.; Moreno, S. F. y Cruz, C. G. 2011. Los suelos del estado de México y su actualización a la base referencial mundial del recurso suelo 2006. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 8(2):71-84.
- Tadeo, R. M.; Zamudio, G. B.; Espinosa, C. A.; Turrent, F. A.; Cárdenas, M. A. L.; López, L. C.; Arteaga, E. I. y Valdivia, B. R. 2015. Rendimiento de maíces nativos e híbridos en diferente fecha de siembra y sus unidades calor. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(6):33-43.
- Tadeo, R. M.; Espinosa, C. A.; Canales, I. E.; López, L. C.; Zamudio, G. B.; Turrent, F. A.; Gómez, M. N.; Sierra, M. M.; Martínez, G. A.; Valdivia, B. R. and Andrés, M. P. 2020. Grain yield and population densities of new corn hybrids released by the INIFAP and UNAM for the high valleys of Mexico. *Terra Latinoam.* 3(38):507-515. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.557>.
- Tejada, M.; Rodríguez, M. B.; Gómez, I.; Franco, A. L.; Benítez, C. and Parrado, J. 2016. Use of biofertilizers obtained from sewage sludges on maize yield. *Eur. J. Agron.* 1(78):13-19.
- Tejada, M.; Rodríguez, M. B. P. P. and Parrado, J. 2018. Effects of foliar fertilization of a biostimulant obtained from chicken feathers on maize yield. *Eur. J. Agron.* 1(96):54-59.
- Turrent, F. A.; Cortés, F.; Espinosa, C. A.; Turrent, T. C. y Mejía, A. H. 2016. Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(7):1727-39.
- Vaughan, A. K. F. 1977. The relation between the concentration of boron in the reproductive and vegetative organs of maize plants and their development. *Rhod. J. Agric. R.* 9(15):163-170.
- Vázquez, C. G.; Martínez G. A.; Zamudio, G. B.; Espinosa, C. A.; Tadeo, R. M.; y Turrent, F. A. 2020. Estabilidad de rendimiento y características fisicoquímicas de grano de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(11):1803-1814.
- Yakhin, O. I.; Lubyantsev, A. A.; Yakhin, I. A. and Brown, P. H. 2017. Biostimulants in plant science: a global perspective. *Front. Plant Sci.* 1(7):1-32. Doi: 10.3389/fpls.2016.02049.
- Zamudio, G. B.; Félix, R. A.; Martínez, G. A.; Galvão, C. J. C.; Espinosa, C. A. y Tadeo, R. M. 2018. Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Rev. Mex. Cien Agríc.* 6(9):1231-1244.
- Zhao, Y. 2010. Auxin biosynthesis and its role in plant development. *Annu. Rev. Plant Biol.* 1(61):49-64. Doi: 10.1146/annurev-arplant-042809-112308.