

Rendimiento, rentabilidad y eficiencia agronómica de nitrógeno en maíz de secano con fertilización foliar complementaria de Zn y Mo

Yield, profitability and agronomic efficiency of nitrogen in rainfed maize with complementary foliar fertilization of Zn and Mo

Líder Muñoz Navarrete¹; George Cedeño-García²; Galo Cedeño García^{3,*}; Benny Avellan Cedeño⁴

1 Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí, km 13 ½ vía Portoviejo - Santa Ana, Santa Ana, Manabí, Ecuador.

2 Departamento de Agronómica, Universidad Técnica de Manabí, km 13 ½ vía Portoviejo - Santa Ana, Santa Ana, Manabí, Ecuador.

3 Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Campus Politécnico El Limón, km 2 ½ vía Calceta - El Gramal. Calceta, Manabí, Ecuador.

4 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Estación Experimental Portoviejo, km 12 vía Portoviejo - Santa Ana, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

*Autor corresponsal: gcedeno@espam.edu.ec (G. Cedeño-García).

ID ORCID de los autores

L. Muñoz Navarrete:  <http://orcid.org/0000-0002-2974-2716>

G. Cedeño-García:  <http://orcid.org/0000-0001-8271-5752>

G. Cedeño García:  <http://orcid.org/0000-0002-0927-5807>

B. Avellan Cedeño:  <http://orcid.org/0000-0002-0820-4222>

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de aplicaciones foliares complementarias de Zn y Mo sobre el rendimiento, rentabilidad y eficiencia agronómica del nitrógeno en maíz de secano. El trabajo se desarrolló durante las temporadas lluviosas 2020 y 2021, en el valle del río Carrizal, Manabí, Ecuador. Los tratamientos evaluados fueron: Fertilización edáfica NPK complementada con aplicación foliar de Zn y Mo (T1), y fertilización edáfica NPK sin aplicación foliar de Zn y Mo (T2). Se registró el rendimiento de grano (RG), eficiencia agronómica de N (EAN) y el beneficio económico neto de la fertilización (BEN). Los datos fueron analizados con prueba estadística de t de Student para observaciones pareadas. El tratamiento T1 aumentó el RG en 15,58% y 14,03% durante el 2020 y 2021, respectivamente, con respecto al tratamiento T2. Del mismo modo, el tratamiento T1 incrementó la EAN en un 28,30% y 24,60%, en las temporadas 2020 y 2021, respectivamente, con respecto al tratamiento T2. Finalmente, el tratamiento T1 produjo el mayor BEN, con un incremento del 23,05% y 16,37%, durante el 2020 y 2021, respectivamente, con relación al tratamiento T2. La fertilización foliar complementaria con Zn y Mo, potenció el efecto de la fertilización edáfica NPK e incrementó el rendimiento, rentabilidad y EAN en maíz de secano.

Palabras clave: *Zea mays*; nutrición foliar; micronutrientes; productividad; beneficio económico.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the effect of complementary foliar applications of Zn and Mo on the yield, profitability, and agronomic efficiency of nitrogen in rainfed maize. The work was carried out during the rainy seasons of 2020 and 2021 in the Carrizal river valley, Manabí, Ecuador. The treatments evaluated were: NPK soil fertilization supplemented with foliar application of Zn and Mo (T1) and NPK soil fertilization without foliar application of Zn and Mo (T2). Grain yield (RG), agronomic efficiency of N (EAN), and the net economic benefit of fertilization (BEN) were recorded. Data were analyzed with Student's t-test for paired observations. Treatment T1 increased the RG by 15.58% and 14.03% during 2020 and 2021, respectively, concerning treatment T2. Similarly, the T1 treatment increased the EAN by 28.30% and 24.60% in the 2020 and 2021 seasons, respectively, concerning the T2 treatment. Finally, treatment T1 produced the highest BEN, with an increase of 23.05% and 16.37%, during 2020 and 2021, respectively, about treatment T2. Complementary foliar fertilization with Zn and Mo enhanced the effect of NPK soil fertilization and increased yield, profitability, and EAN in rainfed maize.

Keywords: *Zea mays*; foliar nutrition; micronutrients; productivity; economic benefit.

Recibido: 10-07-2022.

Aceptado: 28-09-2022.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de vital importancia para el país, en el orden alimentario, social y económico, dado que contribuye a sustentar la seguridad alimentaria de la población, genera plazas de empleo de forma directa e indirecta, y sostiene la actividad económica del sector pecuario y la industria especializada en alimentación animal (Analuisa et al., 2020; Hasang et al., 2021). En Ecuador se cosechan anualmente unas 341300 ha, de las cuales el 83% se cultivan bajo condiciones de secano, debido a la carencia de infraestructura de riego permanente (INEC, 2021a; INEC, 2021b).

La principal problemática del cultivo es la baja productividad, con un promedio de 5,72 t ha⁻¹, en relación a países como Argentina, EE.UU., e Israel con rendimientos promedio de 7,55; 10,80 y 19,21 t ha⁻¹, respectivamente (MAG, 2020; FAO, 2021). Lo anterior tiene relación con factores climáticos tales como anomalías en las precipitaciones en medio de la época lluviosa, causando periodos de estrés hídrico, lo cual afecta significativamente la fertilización y la nutrición de cultivos de secano, debido a que la falta de humedad en la superficie del suelo no permite la solubilización eficiente de los fertilizantes granulados aplicados en banda superficial, y sufren pérdidas significativas por volatilización, y por lixiviación y escorrentía cuando se vuelven a presentar las precipitaciones de forma agresiva (Subhani et al., 2012; Zambrano et al., 2018; Siman et al., 2020; Plett et al., 2020; Yao et al., 2021; Ilbay et al., 2021). Sumado a lo anterior, los suelos de Manabí presentan bajos contenidos materia orgánica (MO) y nutrientes claves como N, S, Mn, B, Zn importantes para la producción del maíz, mientras que por el contrario presentan altos niveles de Ca y P (Motato & Pincay, 2015; Cedeño et al., 2018; Vera et al., 2019).

En este contexto, se ha señalado que el nitrógeno es el nutriente más limitante para el rendimiento del maíz, particularmente a través de su papel en la fotosíntesis y otros procesos biológicos como la absorción de agua y minerales, el almacenamiento de vacuolas y el transporte del xilema (Asibi et al., 2019). Sin embargo, la aplicación de N es una gran preocupación en la producción de maíz, debido a que el cultivo recupera menos del 50% del N aplicado, además, el exceso de N afecta la calidad del agua subterránea por alta concentración de nitratos, y la producción de gases de efecto

invernadero se incrementa significativamente, por lo que, mejorar de forma simultánea el rendimiento de granos y la eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) ha sido reconocido como una estrategia necesaria para el desarrollo de la agricultura sostenible (Asibi et al., 2019; Wang et al., 2019).

El rol de micronutrientes como Zn y Mo en la producción de maíz, es de fundamental importancia, dado las funciones fisiológicas que desempeña el Zn como activador enzimático en el metabolismo fotosintético de plantas C4 y el Mo en el metabolismo del nitrógeno (Castillo et al., 2018; Rana et al., 2020a). Sin embargo, la absorción de micronutrientes puede verse limitada por altos contenidos de macronutrientes como Ca y P en el suelo (Fageira, 2001; Palani & Raju, 2019). En este sentido, se ha documentado que niveles altos y excesivos de Ca en el suelo pueden disminuir la absorción de micronutrientes por las plantas, limitando significativamente la producción de los cultivos (Prasad et al., 2016; Abou et al., 2021). Por lo anterior, la nutrición foliar puede complementar a la fertilización edáfica, especialmente con micronutrientes, que por lo general su absorción a través de las raíces es limitada por varios factores limitantes del suelo, más aún en sistemas de secano, donde la baja humedad del suelo limita la absorción eficiente de nutrientes (Subhani et al., 2012; Shiferaw, 2017; Niu et al., 2020; Zahed et al., 2021).

En relación con lo descrito, estudios realizados por Potarzyck & Grzebisz (2009) y Liu et al. (2020) concluyeron que aplicaciones foliares de Zn incrementaron hasta en 18% y 17% el rendimiento de grano del maíz en Polonia y China, respectivamente. Cecilio et al. (2019) reportaron incrementos significativos de rendimiento de grano en maíz con aplicación foliar de molibdeno. En este punto, conociendo de antemano las funciones del Zn y Mo en el metabolismo fotosintético y del nitrógeno en las plantas C4, surgió la pregunta de que, si es posible incrementar la eficiencia agronómica de nitrógeno y rendimiento del maíz con aplicaciones foliares complementarias de Zn y Mo, más aún, cuando no se conocen trabajos previos en el cultivo de maíz a nivel local. Por lo descrito, el objetivo principal del trabajo fue evaluar el efecto de aplicaciones foliares complementarias de Zn y Mo sobre el rendimiento y eficiencia agronómica del nitrógeno en maíz de secano.

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización de la investigación

La investigación se desarrolló durante las temporadas lluviosas del 2020 y 2021, en sistema de secano, en el valle del río Carrizal, Manabí, Ecuador. El ensayo se ubicó en las coordenadas 0°49'10" de latitud sur y 80°10'40" de longitud oeste, con un promedio de precipitaciones de 800 mm anuales.

Material vegetal

Se utilizó el híbrido de maíz INIAP H - 601, que presenta tolerancia a estrés hídrico y un potencial de rendimiento promedio máximo de hasta 7381

kg ha⁻¹. Las semillas fueron tratadas con la mezcla insecticida a base de Thiametoxan en dosis de 3 cc kg⁻¹ de semillas + Thiodicarb en dosis de 15 cc kg⁻¹ de semilla, con la finalidad de proteger las plántulas de insectos chupadores y cortadores. La siembra fue realizada a 0,80 entre hileras y 0,20 m entre plantas.

Tratamientos, diseño estadístico y análisis de datos

Los tratamientos evaluados fueron: Fertilización edáfica NPK complementada con aplicación foliar

de Zn y Mo (T₁), y fertilización edáfica NPK sin aplicación foliar de Zn y Mo (T₂). Cada tratamiento se conformó de 10 parcelas o unidades experimentales de 100 m² (Figura 1). Para comparar el efecto entre tratamientos, se utilizó la distribución *t* de Student para muestras pareadas. Se probaron las hipótesis nula H₀: T₁ = T₂ y alternativa H₁: T₁ ≠ T₂, con un nivel de significancia del 5% de probabilidades de error. El cálculo del estadístico *t* se realizó mediante la ecuación [1].

$$t_{cal} = \frac{\bar{d}}{S_{\bar{d}}} \quad [1]$$

Donde t_{cal} = estadístico *t*; \bar{d} = media de las diferencias; $S_{\bar{d}}$ = error estándar de las diferencias. Con fines de cuantificar la eficiencia agronómica de la fertilización nitrogenada y los beneficios económicos netos de la fertilización foliar, se establecieron parcelas de omisión de N como tratamiento control.

Aplicación de tratamientos

Las aplicaciones foliares de Zn y Mo fueron realizadas con metalosato de Zn (10,2% Zn) y Basfoliar molibdeno (14,2 % Mo y 2,58 % Co), en dosis de 0,5 L ha⁻¹ de cada producto por aplicación, respectivamente. Las aplicaciones fueron realizadas en las etapas fenológicas V5, V10 y V15, a partir de las 16:30 horas, con la finalidad de evitar altas temperaturas y radiación, y aprovechar mayor apertura estomática.

Variables respuesta

Las variables registradas fueron: altura de planta, que fue medida en 10 plantas tomadas al azar del centro de la parcela, lo cual fue registrado en metros con ayuda de una cinta métrica, desde el nivel del suelo hasta la inserción de la última hoja previa a la espiga. El diámetro y longitud de mazorca fueron registrados en 10 mazorcas tomadas al azar del centro de la unidad experimental, para lo cual la longitud se registró en cm desde la base hasta ápice de la mazorca, mientras que el diámetro se registró en el tercio medio de la mazorca, también en cm. El peso de granos por mazorca y peso de 100 granos, fueron registrados en 10 mazorcas tomadas al azar del centro de la unidad experimental, para lo cual la humedad de grano fue ajustada al 14%. El rendimiento de grano fue cuantificado con las

ecuaciones [2] y [3], con una humedad de grano ajustada al 14%.

$$PU(14\%) = \frac{Pa(100-Ha)}{100-Hd} \quad [2]$$

Donde PU = Peso uniformizado (kg); Pa = Peso actual (kg); Ha = Humedad actual (%); Hd = Humedad deseada (14%).

$$Rendimiento (kg ha^{-1}) = \frac{PU(100000 m^2)}{\text{Área parcela útil (m}^2)} \quad [3]$$

La eficiencia agronómica de nitrógeno - EAN (kg de grano kg⁻¹ de N aplicado) fue estimada con la ecuación [4] descrita por IPNI (2012).

$$EA_N = \frac{Rendimiento \text{ de granos con N} - Rendimiento \text{ de grano sin N}}{Dosis \text{ de N aplicado (160 kg ha}^{-1})} \quad [4]$$

Análisis económico de beneficio neto

El beneficio económico neto de la fertilización foliar se cuantificó con la metodología propuesta por Duicela & Ponce (2015). Para esto se estimaron los costos que varían por los tratamientos de fertilización (CqV), que estuvieron en función de los fertilizantes, aplicaciones y cosechas. En el tratamiento control el costo que varía es cero (CqV = 0). Con los datos de rendimiento en quintales que es la unidad comercial a nivel local (qq ha⁻¹) y precio unitario del quintal (USD qq⁻¹) se calcularon los ingresos totales. Con la diferencia entre los rendimientos de los tratamientos de fertilización y el control, se estimaron los incrementos de los ingresos. Con los incrementos de los costos e ingresos se calcularon los beneficios netos específicos de la fertilización foliar.

Manejo específico del experimento

El control de malezas en preemergencia se realizó con la mezcla de los herbicidas Atrazina-80 + Pendimetalin en dosis de 1,5 + 3 litros ha⁻¹, respectivamente. El control de malezas postemergente, se realizó con la mezcla Bentazon + MCPA en dosis de 1,5 litros ha⁻¹, respectivamente. La fertilización se realizó en base a análisis de suelo y demanda nutricional del cultivo. En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis químico de suelo realizado previo al establecimiento del experimento. Se aplicaron 160, 23 y 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, respectivamente.

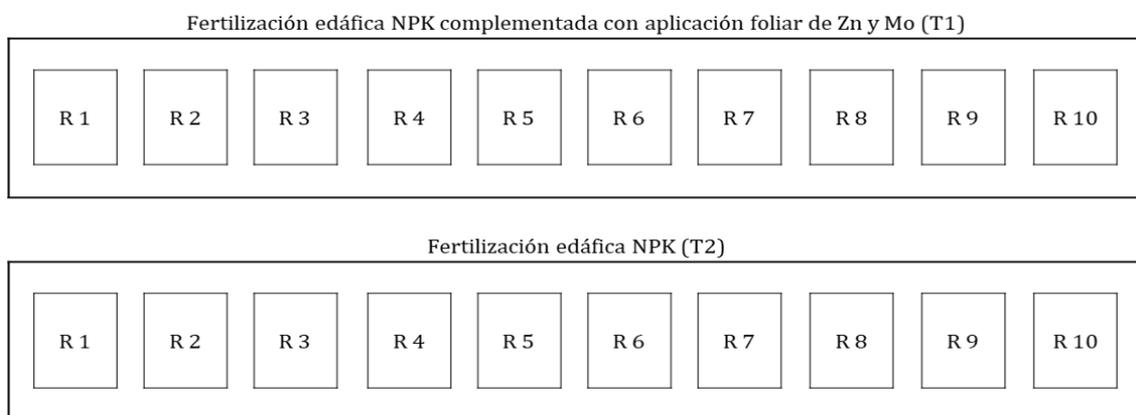


Figura 1. Esquema de la disposición de las parcelas experimentales pareadas, para la comparación de dos tratamientos de fertilización.

Tabla 1

Reporte de análisis químico de suelo, realizado a una profundidad de muestreo de 0 – 20 cm

Nutriente	Unidad	Valores de referencia de acuerdo con el método de Olsen modificado			Resultados		
		Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
N-NH ₄ ⁺	ppm	< 20	20-40	> 40	10		
P	ppm	< 10	10-20	> 20			38
S	ppm	< 10	10-20	> 20		18	
K	meq/100 g	< 0,2	0,2-0,4	> 0,4			0,89
Ca	meq/100 g	< 4	4-8	> 8			17
Mg	meq/100 g	< 1	1-2	> 2			3,3
Cu	ppm	< 1	1-4	> 4			11
Fe	ppm	< 20	20-40	> 40			120
Mn	ppm	< 5	5-15	> 15		12	
Zn	ppm	< 2	2-7	> 7	1,5		
B	ppm	< 0,5	0,5-1	> 1		0,6	
MO	%	< 3	3-5	> 5	2,8		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación foliar de Zn y Mo, influyó significativamente ($p < 0,05$) en el crecimiento y altura de planta, diámetro y longitud de mazorca en ambas temporadas de siembra (Tabla 2). La aplicación foliar de Zn y Mo incrementó la altura de planta en un 19,39% y 11,23% durante las temporadas 2020 y 2021, respectivamente, con relación al tratamiento sin aplicación de Zn y Mo. De la misma manera, el tratamiento foliar con Zn y Mo mostró un incremento de diámetro de mazorca del 5,68% y 5,75%, en las temporadas 2020 y 2021, respectivamente, con relación al tratamiento sin Zn y Mo. Así mismo, la longitud de mazorca se incrementó en un 10,64% y 11,03% en el tratamiento con Zn y Mo foliar, con relación al tratamiento sin aplicación foliar de Zn y Mo, en las temporadas 2020 y 2021, en su orden respectivo (Tabla 2). Los resultados obtenidos indican la importancia del Zn y Mo para el crecimiento de plantas y mazorcas de maíz. Estos resultados son cercanos a los reportados por Asif et al. (2013), quienes independientemente de los niveles de N, obtuvieron una altura de planta de 212, 218 y 220 cm, con 8, 18 y 27 kg de sulfato de Zn ha⁻¹, respectivamente, en relación a los 205 cm de altura de planta alcanzado por el tratamiento sin Zn. Resultados similares fueron descritos por Afolabi (2019) y Singh et al. (2021), quienes también reportaron incrementos de altura de planta con aplicaciones foliares de Zn. En cuanto a crecimiento de mazorca, los resultados hallados se asemejan a

los obtenidos por Potarzycki & Grzebisz (2009), que reportó un crecimiento mazorca de hasta 16 cm, con aplicaciones foliares de Zn, con relación a los 14 cm alcanzados en el tratamiento control sin Zn. Resultados similares fueron alcanzados por Wayasa et al. (2017) y Singh et al. (2021) para longitud de mazorca, con aplicaciones de Zn u otros micronutrientes. En cuanto al efecto del molibdeno, resultados reportados por Trong et al. (2020), demostraron que plántulas de maíz tratadas con Mo toleraron más la sequía, y mostraron mayor tasa de crecimiento radical.

La fertilización foliar con Zn y Mo también influenciaron significativamente ($p < 0,05$) el peso de granos por mazorca, el peso de 100 granos y el rendimiento de granos por hectárea, lo cual evidencia la importancia del Zn y Mo para el llenado y peso de granos (Tabla 3). El peso de granos por mazorca con fertilización foliar de Zn y Mo se incrementó en 10,03% y 13,70% durante las temporadas 2020 y 2021, respectivamente, con relación al tratamiento sin aplicación foliar de Zn y Mo. Del mismo modo, la aplicación foliar de Zn y Mo incrementó el peso de 100 granos en 10,98% durante el 2020 y 17,50% en 2021, con relación al tratamiento sin fertilización foliar con Zn y Mo en 2020 y 2021, respectivamente. Por su parte, la fertilización foliar con Zn y Mo aumentó el rendimiento de grano en 15,58% durante el 2020, con respecto al tratamiento control sin Zn y Mo.

Tabla 2

Efecto de aplicaciones foliares de Zn y Mo sobre la altura de planta, longitud y diámetro de mazorcas en maíz amarillo duro

Variables	Medias de tratamientos en función de Zn-Mo		\bar{d}	$T_{estadístico}$	Valor crítico de $t_{0,05}$	p-valor
	Con Zn-Mo	Sin Zn-Mo				
Temporada lluviosa 2020						
Altura de planta (m)	2,63	2,12	0,50	10,41	2,10	0,0380
Diámetro de mazorca (cm)	4,40	4,15	0,25	7,54	2,10	0,0022
Longitud de mazorca (cm)	15,42	13,78	1,64	7,71	2,10	0,0313
Temporada lluviosa 2021						
Altura de planta (m)	2,76	2,45	0,31	4,07	2,10	0,0028
Diámetro de mazorca (cm)	4,35	4,10	0,25	7,21	2,10	0,0412
Longitud de mazorca (cm)	18,41	16,38	2,04	5,02	2,10	0,0007

Tabla 3

Efecto de aplicaciones foliares de Zn y Mo sobre el peso de mazorcas, peso de 100 granos y rendimiento del maíz amarillo duro

Variables	Medias de tratamientos en función de Zn-Mo		\bar{d}	$T_{estadístico}$	Valor crítico de $t_{0,05}$	p-valor
	Con Zn-Mo	Sin Zn-Mo				
Temporada lluviosa 2020						
Peso de granos por mazorca (g)	111,22	100,06	11,16	12,46	2,10	0,0051
Peso de 100 granos (g)	31,52	28,06	3,45	25,06	2,10	0,0275
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	6481,72	5431,60	1050,12	8,83	2,10	0,0001
Temporada lluviosa 2021						
Peso de granos por mazorca (g)	105,44	90,99	12,45	20,65	2,10	0,0080
Peso de 100 granos (g)	25,65	21,16	4,48	13,26	2,10	0,0214
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	6871,12	5907,10	964,12	9,10	2,10	0,0001

Durante la temporada 2021, el rendimiento de grano se incrementó en un 14,03% con la aplicación foliar de Zn y Mo, en comparación al tratamiento control sin Zn y Mo (Tabla 3). Estos resultados son similares a los encontrados por Potarzycki & Grzebisz (2009), quienes reportaron aumentos significativos de peso de 1000 granos con aplicación foliar de Zn, y un incremento del rendimiento de grano de alrededor del 18% (media de tres años) en comparación con el tratamiento fertilizado solo con NPK. Resultados semejantes fueron hallados por Asif et al. (2013), quienes reportaron mayor peso y rendimiento de granos con aplicación de N y Zn, donde se obtuvieron hasta 7,9 t ha⁻¹ de grano, en comparación a tratamientos con N, pero sin Zn, que alcanzaron rendimientos menores a 6 t ha⁻¹. Por su parte, Afolabi (2019), Liu et al. (2020) Singh et al. (2021) lograron resultados similares en maíz con tratamientos de fertilización con Zn. En cuanto al efecto del molibdeno, Cecilio et al. (2019) reportaron mayores rendimientos de mazorcas y granos en maíz dulce que recibió fertilización foliar con Mo, en comparación a tratamientos sin Mo. Zoz et al. (2012) reportaron que la aplicación foliar de Mo hasta una dosis de 35 g ha⁻¹ incrementó el número de espigas por metro cuadrado y el rendimiento de trigo. Por su parte, Liu et al. (2020) reportaron mayor peso y rendimiento de grano en trigo que recibió fertilización foliar con Zn y Mo, en comparación al tratamiento control. En este mismo contexto, Steiner & Zoz (2015) concluyeron que la aplicación de 58 y 68 g ha⁻¹ de Mo resultó en un aumento de la masa de mil achenos (40%) y el rendimiento de achenos (27%) del girasol, respectivamente, en comparación con el control. La eficiencia agronómica del N (EAN) fue afectada positiva y significativamente ($p < 0,05$) por la aplicación foliar de Zn y Mo, lo cual sugiere que tanto el Zn y Mo son nutrientes claves para mejorar el uso eficiente de N en maíz (Figura 2). Durante la temporada del 2020, la aplicación foliar de Zn y Mo incrementó la EAN en un 28,30%, con respecto al tratamiento sin aplicación de Zn y Mo. En la temporada del 2021, la fertilización foliar de Zn y Mo incrementó la EAN en un 24,60 %, con relación al tratamiento control sin Mo y Zn (Figura 2). Los resultados se asemejan a los hallados por Potarzycki & Grzebisz (2009), quienes alcanzaron mayores tasas de eficiencia de absorción de N en maíz complementado con nutrición foliar de Zn. Gharibi et al. (2016) reportaron mayor eficiencia de absorción de N en

tratamientos que incluían aplicación foliar de Zn, B y Fe. Por su parte, Pooniya et al. (2017) obtuvieron mayor EAN en maíz con aplicación urea de lenta liberación recubierta con S, B y Zn.

No fue posible contrastar nuestros resultados de EAN en función de aplicaciones foliares complementarias con Mo, debido a la escasez de trabajos previos realizados en maíz con nutrición foliar a base de Mo. Sin embargo, en el cultivo de trigo se ha reportado que la aplicación de Mo aumentó la eficiencia de absorción de N en 38,26%, 68,24% y 71,53% cuando las plantas se trataron con tasas bajas de NH₄⁺, NO₃⁻ y NH₄NO₃, respectivamente. Mientras que, a una tasa alta de N, la eficiencia de absorción de N aumenta a 46,26% y 45,34% en el caso de los tratamientos con NO₃⁻ y NH₄NO₃, respectivamente, y se redujo ligeramente a 10,84% cuando las plantas recibieron NH₄⁺ (Moussa et al., 2021). Por su parte, Mellis et al. (2022) concluyeron que el suministro de Mo no afectó la actividad de Nitrato reductasa en hojas de caña de azúcar, pero aumentó un 48% el uso eficiente de nitrógeno, lo que sugiere un efecto positivo de Mo en otra vía del metabolismo del N. Los niveles de EAN logrados en nuestro estudio, se mantienen dentro de los márgenes descritos por Dobermann (2007), quien menciona que la EAN para cereales como el maíz está en el rango de 10 a 30 kg de incremento de granos kg⁻¹ de N aplicado.

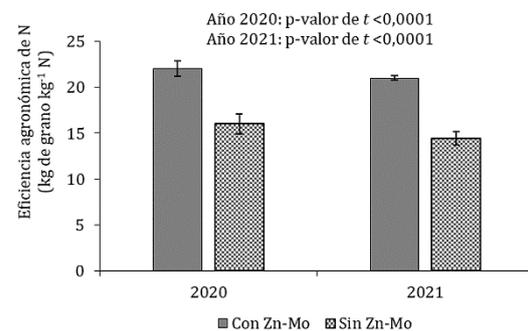


Figura 2. Eficiencia agronómica de nitrógeno en función de aplicaciones foliares de Zn y Mo. Cada barra representa la media de tres repeticiones (\pm error estándar).

En la Tabla 4 se presenta detalladamente los resultados del análisis del beneficio económico neto de la fertilización complementaria con Zn y Mo. Durante la temporada 2020, la fertilización complementaria con Zn y Mo alcanzó el mayor beneficio económico total del maíz y neto de la

fertilización, con un incremento del 19,94% y 23,05%, respectivamente, con la relación al tratamiento que no recibió aplicación de Zn y Mo. De forma similar, en el año 2021, el mayor beneficio económico total del maíz y neto de la fertilización fue logrado con la aplicación complementaria de Zn y Mo, con un incremento del 15,13% y 16,37%, respectivamente, en comparación al tratamiento que no recibe fertilización complementaria con Zn y Mo. Los mayores incrementos de los beneficios económicos, son el efecto directo de los mayores incrementos de rendimiento e ingresos, en relación al tratamiento que solo recibió fertilización edáfica, sin aplicación complementaria de Zn y Mo (Tabla 4).

Los resultados de beneficio económico neto obtenidos con la fertilización foliar complementaria de Zn y Mo, se asemejan a los reportados por Wayasa et al. (2017), quienes lograron mayor relación beneficio-costos con aplicaciones foliares combinadas de Zn y B en maíz, con relación a tratamientos con aplicaciones individuales de estos micronutrientes. Resultados similares fueron hallados por Pooniya et al. (2017), quienes reportaron mayores beneficios económicos en maíz que recibió fertilización foliar con S, Zn y B, en comparación a tratamientos controles. Así mismo, Singh et al. (2021), alcanzaron mayores retornos económicos cuando la fertilización nitrogenada del

maíz fue complementada con aplicaciones foliares de Zn.

El mayor rendimiento, eficiencia agronómica de nitrógeno y beneficios económicos alcanzados con la fertilización edáfica complementada con nutrición foliar de Zn y Mo, en relación a la fertilización edáfica convencional, pueden relacionarse con las funciones fisiológicas que desempeña en Zn en especies C4 como el maíz, y el rol del Mo en el metabolismo del nitrógeno. En este contexto, se ha determinado la importancia del Zn para la catálisis de la enzima anhidrasa carbónica (AC) que actúa en la fijación de carbono en especies C4, dado que estas especies no pueden metabolizar directamente el CO₂, sino que este último debe ser transformado por la AC en HCO₃ (Salama et al., 2006; Studer et al., 2014; Castillo et al., 2018; Hacısalihoglu, 2020). Por su parte, el Mo participa como grupo prostético junto al Fe y Co como cofactores enzimáticos FeMo y MoCo en las reacciones de la nitrogenasa y nitrato reductasa, respectivamente, que tienen un papel importante en el metabolismo y asimilación del nitrógeno en las plantas y microorganismos, por lo que es de esperar que el uso eficiente de nitrógeno mejore con niveles adecuados de Mo (Broadley et al., 2012; Boyd et al., 2015; Rana et al., 2020a; Rana et al., 2020b; Anas et al., 2020).

Tabla 4

Beneficio económico neto de la fertilización complementaria con Zn y Mo en maíz amarillo duro

Tratamientos	CT	CqnV	CqV	ICqV	Ren	IRen	PUV	Iing	IT	BET	BEN
Beneficio económico neto de la temporada lluviosa 2020											
Con Zn-Mo	1155	510	645	390	143	82	14,6	1197	2088	933	807
Sin Zn-Mo	1005	510	495	240	120	59	14,6	861	1752	747	621
Omisión de N	765	510	255	0	61	0	14,6	0	891	0	0
Beneficio económico neto de la temporada lluviosa 2021											
Con Zn-Mo	1167	525	642	297	151	86	14,6	1256	2205	1038	959
Sin Zn-Mo	1017	525	492	147	130	65	14,6	949	1898	881	802
Omisión de N	870	525	345	0	65	0	14,6	0	949	0	0

CT: Costos totales (USD ha⁻¹), CqnV: Costos que no varían por la fertilización - USD ha⁻¹ (Semilla, preparación de terreno, semilla, siembra, control fitosanitario), CqV: Costos que varían por la fertilización - USD ha⁻¹ (Fertilizantes, aplicaciones y labor de cosecha), ICqV: Incremento de costos que varían por la fertilización - USD ha⁻¹ (ICqV = CqV_{tratamientos} - CqV_{control}), Ren: Rendimiento (qq ha⁻¹), IRen: Incremento de rendimiento de tratamientos de fertilización con relación al control (IRen = Ren_{tratamientos} - Ren_{control}), PUV: Precio unitario de venta (USD qq⁻¹), Iing: Incremento de ingresos con fertilización con relación al control - USD ha⁻¹ (Iing = IRen * PUV), IT: Ingresos totales USD ha⁻¹ (IT = Ren * PUV), BET: Beneficio económico total - USD ha⁻¹ (BET = IT - CT), BEN: Beneficio económico neto de la fertilización - USD ha⁻¹ (BEN = Iing - ICqV).

CONCLUSIONES

La aplicación foliar complementaria con Zn y Mo fue efectiva para incrementar los componentes de rendimiento y el rendimiento de grano en maíz amarillo duro de secano. La eficiencia agronómica del nitrógeno fue mejorada con tres aplicaciones foliares complementarias de Zn y Mo. La aplicación

foliar complementaria con Zn y Mo produjo mayores beneficios económicos, con relación a la fertilización edáfica convencional. Se sugiere realizar estudios futuros en suelos con bajo y altos contenidos de Mo, para contrastar los resultados obtenidos y realizar ajustes de recomendaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, por haber financiado parcialmente esta investigación a través del proyecto "Fortalecimiento de la agricultura familiar local mediante aplicación de buenas prácticas de manejo de suelo, cultivos, bioinsumos y poscosecha" con código CUP 384767 que se ejecutan actualmente en la

institución, tal como consta en la Secretaría de Planificación del Estado Ecuatoriano. Así mismo se agradece a la Estación Experimental Portoviejo del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), por haber colaborado con la semilla certificada y la logística durante la ejecución de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Analuisa, I., Guerrero, J., Fernández, J., & Rodríguez, O. (2020). Caracterización socioeconómica del agricultor maicero en la Provincia de Manabí mediante técnicas de análisis multivariantes. *Revista Podium*, 37, 1–16.
- Abou, M., Abou, E., Yassen, A., & Hammad, S. (2021). Boron, Structure, Functions and Its Interaction with Nutrients in Plant Physiology. A Review. *Middle East J. Agric. Res.*, 10(1), 117-179.
- Asibi, A., Chai, Q., & Coulter, J. (2019). Mechanisms of Nitrogen Use in Maize. *Agronomy*, 9(12), 775.
- Asif, M., Saleem, M., Anjum, S., Wahid, M., & Bilal, M. (2013). Effect of nitrogen and zinc sulphate on growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *J. Agric. Res.*, 51(4), 455–464.
- Afolabi, S. (2019). Response of maize (*Zea mays* L.) to rates of nitrogen and zinc application in minna, southern guinea savanna of Nigeria. *Journal of Agricultural Sciences*, 64(2), 12–131.
- Anas, M., Liao, F., Verma, K., Sarwar, M., Mahmood, A., Chen, Z., Li, Q., Zeng, X., Liu, Y., & Li, Y. (2020). Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biol Res.*, 53(1), 47.
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Functions of micronutrients. in: Marschner, P. (ed.) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*, 3rd ed, 2012. Academic Press Amsterdam, Netherlands. pp. 135-189.
- Boyd, E., Garcia, A., Hamilton, T., Mus, F., & Peters, J. (2015). Evolution of Molybdenum Nitrogenase during the Transition from Anaerobic to Aerobic Metabolism. *J. Bacteriol.* 197, 1690–1699.
- Castillo, J., Ojeda, M., Hernández, A., González, A., Robles, L., & López, R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*. 43(4), 242–248.
- Cedeño, F., Cargua, J., Cedeño, J., Mendoza, J., López, G., & Cedeño, G. (2018). Aplicación foliar de micronutrientes y fitoreguladores como complemento de la fertilización edáfica en maíz amarillo duro. *La Técnica*, 19, 19–30.
- Cecilio, A., López, M., Rugeles, S., & Mendoza, J. (2019). Molybdenum dosage and application timing in sweet corn. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(2), 219-227.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency-measurement and mangement. Proc. of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium. March 7–9, 2007.
- Duicela, L., & Ponce, L. (2015). Uso de fungicidas sistémicos en el control de la roya del café (Hemileia vastatrix Berk. & Br.) en la provincia de Manabí. *La Técnica*, 15, 6-17.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación). (2021). FAOSTAT, Cultivos y productos de ganadería. Consultado en línea (28 de enero de 2022): <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fageria, V. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269-1290.
- Gharibi, A., Hammam, G., Salwau, M., Allam, S. & El-Gedwy, M., (2016). Response of Maize Yield to Nitrogen Fertilization and Foliar Spray by Some Microelements. *J. Plant Production, Mansoura Univ.*, 7(5), 455–463.
- Hasang, E., García, S., Carrillo, M., Durango, W., & Cobos, F. (2021). *Selva Andina Biosph.*, 9(1), 26-40.
- Hacisalihoglu, G. (2020). Zinc (Zn): The Last Nutrient in the Alphabet and Shedding Light on Zn Efficiency for the Future of Crop Production under Suboptimal Zn. *Plants*, 9(11), 1471.
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). (2012). 4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition. T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.P. Sulewski. (eds.) International Plant Nutrition Institute. Norcross, Georgia, USA. 419 pp.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). (2021a). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua, 2020. Boletín técnico 2021. Quito, Ecuador, 15 p.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). (2021b). Módulo de información agroambiental y tecnificación 2020. Boletín técnico 2021. Quito, Ecuador, 15 p.
- Ilbay, M., Ilbay, F., Zubieta, R., García, M., & Chasi, P. (2021). Impacts of Climate Change on the Precipitation and Streamflow Regimes in Equatorial Regions: Guayas River Basin. *Water*, 13(21), 3138.
- Liu, D., Zhang, W., Liu, Y., Chen, X., & Zou, C. (2020). Soil Application of Zinc Fertilizer Increases Maize Yield by Enhancing the Kernel Number and Kernel Weight of Inferior Grains. *Front. Plant Sci.*, 11,188.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2020). Sistema de información pública agropecuaria (SIPA). Ficha del cultivo de maíz duro seco (*Zea mays* L.) 2020.
- Mellis, E., Kölln, O., Moreira, L., Otto, R., Almeida, R., Ramos, L., Andrade, R., & Franco, H. (2022). Molybdenum increases nitrogen use efficiency of sugarcane under limited N supply. *Journal of Plant Nutrition*. 45(9), 1360–1369.
- Motato, N., & Pincay, J. (2015). Calidad de los suelos y aguas para riego en áreas cacaoteras de Manabí. *La Técnica*, 14, 6-23.
- Moussa, M., Hu, C., Elyamine, A., Ismael, M., Rana, M., Imran, M., Syaifudin, M., Tan, Q., Marty, C., & Sun, X. (2021). Molybdenum-induced effects on nitrogen uptake efficiency and recovery in wheat (*Triticum aestivum* L.) using ¹⁵N-labeled nitrogen with different N forms and rates. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(6), 613–621.
- Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2020). Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 104–118.
- Palani, V., & Raju, I. (2019). Synergistic and Antagonistic Interactions of Calcium with Other Nutrients in Soil and Plants. <https://ssrn.com/abstract=3503225>
- Pooniya, V., Shivay, Y., Pal, M., & Bansal, R. (2017). Relative performance of boron, sulphur and zinc coatings onto prilled urea for increasing productivity and nitrogen use efficiency in maize. *Experimental Agriculture*, 54(4), 577-591.
- Potarzycki, J., & Grzebisz, W. (2009). Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components. *Plant Soil Environ*, 55(12), 519–527.
- Plett, D., Ranathunge, K., Melino, V., Kuya, N., Uga, Y., & Kronzucker, H. (2020). The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, 71(15), 4452–4468.
- Prasad, R., Singh, Y., & Kumar, G. (2016). Interactions of Zinc with Other Nutrients in Soils and Plants - A Review. *Indian Journal of Fertilisers*, 12(5), 16-26.
- Rana, M., Bhantana, P., Imran, M., Saleem, M., Moussa, M., Khan, Z., et al. (2020a). Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. *Ann Environ Sci Toxicol*, 4(1), 032-044.
- Rana, M., Bhantana, P., Sun, X., Imran, M., Shaaban, M., Moussa, G., Saleem, M., Elyamine, A., Binyamin, R., Alam, M., Afzal, J., Khan, I., Din, I., Ahmad, I., Younas, M., Kamran, M., & Hu, C. (2020b). Molybdenum as an Essential Element for Crops: An Overview. *Biomed J Sci & Tech Res*, 24(5), BJSTR.MSID.004104.
- Salama, Z., El-Fouly, M., Lazova, G., & Popova, L. (2006). Carboxylating enzymes and carbonic anhydrase functions were suppressed by zinc deficiency in maize and chickpea plants. *Acta Physiol Plant*, 28, 445–451.
- Studer, A., Gandin, A., Kolbe, A., Wang, L., Cousins, A., & Bruntzell, T. (2014). A Limited Role for Carbonic Anhydrase in C4 Photosynthesis as Revealed by a calca2 Double Mutant in Maize. *Plant Physiology*, 165, 608–617.
- Steiner, F., & Zoz, T. (2015). Foliar application of molybdenum improves nitrogen uptake and yield of sunflower. *African Journal of Agricultural Research*, 10(17), 1923-1928.
- Shiferaw, D. (2017). Water-Nutrients Interaction: Exploring the Effects of Water as a Central Role for Availability & Use Efficiency of Nutrients by Shallow Rooted Vegetable Crops - A Review. *Journal of Agriculture and Crops*, 3(10), 78-93.
- Singh, J., Partap, R., Singh, A., kumar, N., & Krity. (2021). Effect of Nitrogen and Zinc on Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 12(3), 179-185.
- Siman, F., Andrade, F., & Passos, R. (2020). Nitrogen Fertilizers and NH3 Volatilization: Effect of Temperature and Soil Moisture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(10), 1283-1292.
- Subhani, A., Tariq, M., Sulaman, M., Latif, R., Khan, M., Sajid, M., & Shahid, M. (2012). Role of Soil Moisture in Fertilizer Use Efficiency for Rainfed Areas-A Review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 2(11), 1-10.
- Trong, L., Thinh, B., & Hung, N. (2020). Impacts of molybdenum on drought tolerance of some maize (*Zea mays* L.) cultivars at seedling stage. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 21(19-20), 70-77.
- Vera, L., Hernández, A., Mesías, F., Cedeño, A., Guzmán, A., Ormaza, K., & López, G. (2019). Principales suelos y particularidades de su formación del sistema Carrizal-Chone, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 40(2), e06.

- Wang, Z., Ma, B., Yu, X., Gao, J., Sun, J., Su, Z., & Yu, Z. (2019). Physiological Basis of Heterosis for Nitrogen Use Efficiency of Maize. *Scientific Reports*, 9(1), 18708.
- Wasaya, A., Shabir, M., Hussain, M., Ansar, M., Aziz, A., Hassan, W., & Ahmad, I. (2017). Foliar application of Zinc and Boron improved the productivity and net returns of maize grown under rainfed conditions of Pothwar plateau. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 33-45.
- Yao, Y., Dai, Q., Gao, R., Gan, Y., & Yi, X. (2021). Effects of rainfall intensity on runoff and nutrient loss of gently sloping farmland in a karst area of SW China. *PLoS ONE*, 16(3), e0246505.
- Zambrano, E., Rivadeneira, J., & Pérez, M. (2018). Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. *Science of the Total Environment*, 643, 193-207.
- Zahed, Z., Kumar, S., Mahale, A., Krishna, R., & Mufti, S. (2021). Foliar Micro-nutrition of Vegetable Crops - A Critical Review. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(7), 1-12.
- Zoz, T., Steiner, F., Testa, J., Seidel, E., Fey, R., Castagnara, D., & Zoz, A. (2012). Foliar fertilization with molybdenum in wheat. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, 33(2), 633-638.