

Respuesta del café a la fertilización con zinc en suelos de la zona cafetera colombiana *

Alveiro Salamanca-Jimenez

ASJ Agroservices, Popayán, Colombia, Consultor en Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas.
asalamancaj@asjagroservices.com  <https://orcid.org/0000-0002-6400-0283>

Luis Fernando Salazar-Gutiérrez

Investigador Científico Cenicafe, Manizales - Colombia.
luisfernando.salazar@cafedecolombia.com  <https://orcid.org/0000-0003-2302-4825>

Siavosh Sadeghian-Khalajabadi

Investigador Científico Cenicafe, Manizales - Colombia.
siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com  <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885>

RESUMEN

Aunque el zinc (Zn) es un microelemento esencial para la nutrición del café por su efecto directo sobre el crecimiento y porque sus deficiencias en las etapas vegetativas son cada vez más comunes, son pocas las investigaciones relacionadas con este nutriente en Colombia. Por ello, con el objetivo de evaluar la respuesta del café variedad Colombia renovado por zoca a la fertilización con zinc (Zn), se realizó una investigación en tres localidades: Venecia, Gigante y Timbío. Los tratamientos consistieron en tres dosis de Zn (5, 10 y 20 kg.ha⁻¹), aplicadas al suelo en forma de óxido (ZnO), y tres dosis de Zn (0,045, 0,09 y 0,18 kg.ha⁻¹), aplicadas vía foliar como quelato, además de un testigo sin aplicación de Zn. Durante el primer año, la aplicación edáfica se realizó a los dos y ocho meses después del zoqueo, y a partir del segundo año, cada seis meses con la recomendación NPK según el análisis de suelo. La aplicación foliar se realizó a los 60 y 90 días después del pico de floración tanto para la cosecha principal como para la mitaca de cada sitio. Se midió la producción anual de café cereza y acumulada durante cuatro años. Para las condiciones del estudio la fertilización edáfica o foliar de Zn no tuvo efectos significativos en la producción de café cereza pero si se registraron aumentos en los niveles de Zn en el suelo y en las hojas.

PALABRAS CLAVE

Coffea arabica; zoca; fertilización foliar; análisis de suelos; análisis foliar

Coffee crop response to zinc fertilization in soils of the Colombian coffee region

ABSTRACT

Even though Zn is an essential micronutrient for coffee nutrition due to its direct effect on plant growth and because Zn deficiencies are more and more frequent, research related to this nutrient in coffee in Colombia is still little. For these reasons, aiming to determine the Colombian variety coffee crop response to zinc fertilization (Zn) in three sites of the Colombian coffee region, the supply of three Zn rates applied to soil in the form of ZnO (5, 10 and 20 kg.ha⁻¹), and three doses of Zn quelate applied via foliar (0.5, 1.0 and 2.0 kg.ha⁻¹), plus a control without Zn were evaluated. The research was carried out in three sites: Venecia, Gigante and Timbio. During the first year; soil treatments were applied two and eight months after trimming, and from the second year; the edaphic application was carried out every six months simultaneously with the NPK recommendation according to soil analysis. Foliar application was carried out at 60 and

Recibido: 17/02/2021 Aceptado: 11/06/2021

* Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Cómo citar este artículo: SALAMANCA-JIMENEZ, Alveiro; SALAZAR-GUTIÉRREZ, Luis Fernando; SADEGHIAN-KHALAJABADI, Siavosh. Respuesta del café a la fertilización con zinc en suelos de la zona cafetera colombiana. *En:* Entramado. Julio - Diciembre, 2021 vol. 17, no. 2 p. 268-279 <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.7879>



90 days after the blooming peak for both main harvest and the "mitaca" of each site. Coffee berries yield annually and accumulated over four years were analyzed. For the study conditions the Zn application both edaphic and foliar did not affect significantly coffee yield but did increase the Zn contents at soil and leaves.

KEYWORDS

Coffea arabica; trimming; foliar fertilization; soil analysis; foliar analysis

Resposta do café à fertilização com zinco nos solos da zona cafeeira

R E S U M O

Embora o zinco (Zn) seja um microelemento essencial para a nutrição do café devido a seu efeito direto no crescimento e porque suas deficiências nas etapas vegetativas são cada vez mais comuns, há pouca pesquisa relacionada a este nutriente na Colômbia. Por esta razão, com o objetivo de avaliar a resposta do café da variedade Colômbia, renovado pelo zoca, à fertilização com zinco (Zn), foi realizada uma investigação em três locais: Venecia, Gigante e Timbío. Os tratamentos consistiram em três doses de Zn (5, 10 e 20 kg.ha⁻¹), aplicadas ao solo na forma de óxido (ZnO), e três doses de Zn (0,045, 0,09 e 0,18 kg.ha⁻¹), aplicadas por aplicação foliar como quelato, além de um controle sem aplicação de Zn. Durante o primeiro ano, a aplicação do solo foi realizada dois e oito meses após a enxada, e a partir do segundo ano, a cada seis meses com a recomendação da NPK de acordo com a análise do solo. A aplicação foliar foi feita aos 60 e 90 dias após o pico de floração, tanto para a cultura principal como para a mitaca em cada local. A produção anual e cumulativa de café cereja foi medida ao longo de quatro anos. Para as condições do estudo, a fertilização do solo ou foliar Zn não teve efeito significativo na produção de café cereja, mas foram registrados aumentos nos níveis de solo e de Zn foliar.

PALAVRAS-CHAVE

Coffea arabica; zoca; fertilização foliar; análise do solo; análise foliar

I. Introducción

El zinc (Zn) es un elemento esencial para las plantas, y uno de los metales más abundantes e importantes en el metabolismo de los seres vivos, siendo el único metal presente en las enzimas (Souza, Lopes, Fernandes y Ramos, 2009). Su deficiencia bajo condiciones de campo se reportó por primera vez en cultivos de manzano en California y de cítricos en el sur de Australia, y se afirma que a nivel mundial las deficiencias de Zn son más comunes que las de cualquier otro micronutriente (Barrow, 1993).

El Zn es absorbido desde el suelo con cierta facilidad por las raíces de las plantas en forma de Zn²⁺, sin embargo, su movilidad en la planta es baja. Este tiene funciones como componente y activador de algunas enzimas, es importante en la integridad de las membranas celulares, y es esencial en la síntesis de proteínas y hormonas relacionadas con el crecimiento de las plantas (Marschner, 2012).

En el cultivo del café, el Zn es asimilado como elemento esencial y acumulado en todos sus órganos (Woods, Pietro, Cruz, Damatta y Clemente, 2013), incluyendo los frutos. Por ejemplo, la concentración de Zn en frutos de café Variedad

Castillo® es menor que las de Mn, Fe, B y Cu (Sadeghian, Mejía y Arcila, 2006; Sadeghian y Salamanca, 2015), y esta tendencia es similar en las hojas (Sadeghian y Salamanca, 2015). Con relación a la cantidad removida a través de la cosecha, se estima que 5.625 kg de café cereza - equivalentes aproximadamente a 1.000 kg de café almendra o 1.250 kg de pergamino seco (cps) - extraen del suelo aproximadamente 18 g de este elemento (Sadeghian et al., 2006). Granos de café tostado provenientes de Colombia, México, Honduras y Etiopía reportan contenidos de Zn entre 4 a 6 mg.kg⁻¹ (Cloetee et al., 2019).

Antoniali, Reis, Veiga y Silva (1988) evaluaron en café Borbón rojo durante dos años aplicaciones foliares de ZnSO₄ en dosis desde 0 hasta 18 g.planta⁻¹.año⁻¹, con diferentes frecuencias de aplicación, y encontraron que las mayores producciones se obtuvieron con 6 y 4 g, aplicadas tres y dos veces en los meses de octubre y diciembre respectivamente, mientras que la producción más baja correspondió al testigo. Mediante un análisis económico, concluyeron que el óptimo se obtuvo con 5,4 g.planta⁻¹.año⁻¹, para una producción estimada de 1362 kg cps.ha⁻¹.año⁻¹, y que fue una práctica rentable incluso hasta cuando un kg de ZnSO₄ era 30 veces más costoso que un kg de café pergamino seco (cps¹) producido.

[Costa, Santinato y Figueira \(1992\)](#), en plantas de café variedad Mundo Novo de 6 años aplicaron durante tres años por vía foliar y en forma conjunta sulfato de zinc (0,6%), ácido bórico (0,3%), urea (0,5%) y cloruro de potasio (0,5%), y de forma individual sulfato de zinc (0,6%) y un producto comercial a base de Zn y B (6,0% Zn y 0,5% B), en concentraciones de 0,5, 0,75 y 1,0%, 50 y 70 días después de la floración. Con relación a la concentración de Zn, encontraron un aumento de ésta para todos los tratamientos con relación al testigo sin que ninguna produjera fitotoxicidad, mientras que las producciones más altas se obtuvieron con la aplicación conjunta de las sales y el producto comercial a 0,5% y 0,75%, pero sin diferencias estadísticas.

[Marubayashi, Pedroso, Vitti y Costa \(1994\)](#) evaluaron la aplicación combinada de diferentes fuentes y formas de B y Zn en la producción de café Catuai amarillo y encontraron que las mayores producciones fueron obtenidas con la aplicación edáfica de 45 g/planta de un producto comercial (20% Zn) y la aplicación foliar de ácido bórico (17% B) al 0,3%, cuyos valores fueron de 13,1 y 12,9 sacos².ha⁻¹ respectivamente, en comparación con el testigo que solo produjo 7,2 sacos. ha⁻¹, y también reportan una correlación positiva entre el nivel del Zn en el suelo y la producción.

[Melo, Guimarães, Silva y Nogueira \(1999\)](#), en café variedad Mundo Novo aplicaron vía foliar durante 8 años ZnSO₄ en concentraciones de 0,5, 1,0 y 1,5%, dos y cuatro veces al año (septiembre y junio, y enero, marzo, septiembre y noviembre, respectivamente), y encontraron que la producción del testigo (1725 kg cps.ha⁻¹.año⁻¹) siempre fue menor a los demás tratamientos durante los años de evaluación y que la mayor producción media se obtuvo con la aplicación de ZnSO₄ (0,5%) cuatro veces al año (2300 kg cps.ha⁻¹.año⁻¹), seguida de ZnSO₄ (1,0%) aplicado dos veces al año (2162 kg cps.ha⁻¹.año⁻¹), indicando que es más eficiente un mayor número de aplicaciones a concentraciones bajas. La aplicación de Zn aumentó también el grano retenido sobre las mallas 17 (17,8%) y 15 (52,0%), para un 70% del grano con tamaño grande.

En dos localidades de [Costa Rica, Fonseca y Obando \(2000\)](#) evaluaron durante tres cosechas de café variedad Catuai, el efecto de diferentes fuentes de Zn, aplicadas de forma foliar tres veces al año (mayo, agosto y noviembre), y al suelo en dos aplicaciones (mayo y agosto). Para la primera localidad evaluaron la aplicación foliar de óxido de zinc (0,13%), Zin-vert (0,25%), Metalosato de Zinc (0,5%), Quelatozinc (0,5%), Rimafol Zn (0,13%), Excelzinc (0,13%), Zitrilón (0,13%) y de forma edáfica ZnSO₄ (30 y 90 kg.ha⁻¹), y aunque todos los fertilizantes superaron al testigo entre un 4% y un 13%, no encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos. En la segunda localidad evaluaron el Metalosato de Zinc (0,25%) vía foliar y dosis de 25, 74 y 124 kg.ha⁻¹ de ZnSO₄ de forma edáfica, encontrando aumentos significativos con

la dosis de 25 kg.ha⁻¹ de este fertilizante, y que dosis más altas (> 75 kg.ha⁻¹, de ZnSO₄) causaron detrimentos en la producción por toxicidad.

En Colombia en cuanto a la fertilización con zinc, [Uribe y Salazar \(1981\)](#) evaluaron el efecto de la aplicación al suelo de quelato de Zn a razón de 60 g.planta⁻¹.año⁻¹ sobre la producción de café variedad Caturra en siete campos experimentales de la zona cafetera colombiana, y concluyeron que este elemento no afectó el rendimiento, posiblemente porque los suelos en estudio poseían cantidades suficientes.

Para las condiciones de la zona cafetera colombiana la nutrición con Zn ha sido poco estudiada, aun cuando en algunas regiones sus deficiencias son comunes. Por lo anterior, y debido a que no existían bases experimentales para recomendar este nutriente, se llevó a cabo una investigación con el objetivo de evaluar la respuesta del cultivo de café a la fertilización con Zn en suelos de la zona cafetera colombiana.

2. Materiales y Métodos

Localidades

El experimento se llevó a cabo en tres localidades: La Estación Experimental (EE) El Rosario (municipio de Venecia, Antioquia), finca cafetera (FC) El Troje (municipio de Timbío, Cauca) y Concentración Educativa (CE) Jorge Villamil Ortega (municipio de Gigante, Huila) ([Tabla 1](#)), por estar ubicados en zonas donde es común observar síntomas de deficiencia de Zn en las plantas de café.

En cada localidad se implementó un diseño experimental en bloques completos al azar con 7 tratamientos y 9 repeticiones en la EE El Rosario, 11 repeticiones en la FC El Troje y 8 repeticiones en la CE Jorge Villamil. Los tratamientos consistieron en tres dosis de Zn (5, 10 y 20 kg.ha⁻¹.año⁻¹) aplicadas al suelo en forma de óxido (ZnO) empleando un fertilizante con 70% de ZnO, y tres dosis de Zn (0,045, 0,09 y 0,18 kg.ha⁻¹.año⁻¹) aplicadas vía foliar en forma de quelato EDTA (complejo de ácido etilendiaminotetracético) con 9% de Zn, además de un tratamiento testigo sin aplicación de este elemento ([Tabla 2](#)).

Los cultivos correspondían a café variedad Colombia renovados por zoca. Durante el primer año, los tratamientos edáficos se aplicaron a los dos y ocho meses después de la zoca, en la misma época de aplicación de los demás fertilizantes para esta etapa del cultivo. A partir del segundo año, la aplicación de Zn vía edáfica se realizó cada seis meses, simultáneamente con la recomendación de fertilización (N-P-K) según el análisis de suelo; mientras que la aplicación foliar se realizó a los 60 y 90 días después del pico de floración tanto para la cosecha principal como para la mitaca³ de cada sitio.

Tabla 1.
Ubicación, características agroecológicas y de suelo de las localidades y parcelas experimentales

Ubicación/Propiedad	EE El Rosario	FC El Troje	CE Jorge Villamil
Latitud	5°58'N	2°21'N	2°20'N
Longitud	75°42'O	74°41'O	75°31'O
Altitud (m)	1635	1790	1420
Temperatura promedio (°C)	20,4	18,9*	20,3
Precipitación anual (mm)	2783	2131*	1374
Brillo solar anual (h)	1845	1568*	1116
Humedad relativa (%)	76,3	81,4*	76,4
Distancia de siembra (m)	2 x 1	1 x 1	2 x 1
Densidad (ejes.ha ⁻¹)	10000	10000	10000
Características del suelo			
Unidad suelo	Chinchiná/Venecia	Tambo	La Cristalina
pH	4,4	5,3	4,3
MO (%)	13,4	12,3	4,2
K (cmol _c .kg ⁻¹)	1,20	2,10	0,42
Ca (cmol _c .kg ⁻¹)	2,2	5,7	0,5
Mg (cmol _c .kg ⁻¹)	0,9	3,3	0,3
Al (cmol _c .kg ⁻¹)	6,5	0,5	2,0
CIC (cmol _c .kg ⁻¹)	32,4	23,9	8,8
P (mg.kg ⁻¹)	81,7	26,0	114,8
Fe (mg.kg ⁻¹)	816	745	615
Mn (mg.kg ⁻¹)	19	81	80
Zn (mg.kg ⁻¹)	5,6	12,4	3,0
Cu (mg.kg ⁻¹)	2,0	6,7	3,0
B (mg.kg ⁻¹)	0,6	1,2	0,9
S (mg.kg ⁻¹)	21,8	5,0	11,7
Arcilla (Ar) (%)	49,4	37,3	25,4
Limo (L) (%)	19,9	20,0	19,8
Textura del suelo	Ar	F.Ar.	F.Ar.A

* Estación climática próxima Manuel Mejía municipio El Tambo, Cauca. F.Ar: Franco Arcilloso, Ar: Arcilloso, F.Ar.A: Franco arcillo arenoso. EE: Estación Experimental, FC: Finca Cafetera, CE: Concentración Escolar.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.
Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Modo de aplicación	Fuente	Dosis Zn (kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Dosis fuente (kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹)
T1	Suelo	ZnO (70%) ^a	5	9
T2	Suelo	ZnO (70%)	10	18
T3	Suelo	ZnO (70%)	20	36
T4	Foliar	Quelato Zinc (9%)	0,045 ^b	0,5 ^c
T5	Foliar	Quelato Zinc (9%)	0,09 ^c	1,0 ^c
T6	Foliar	Quelato Zinc (9%)	0,18 ^d	2,0 ^c
T7	Testigo	-	0	0

a: óxido de zinc agrícola al 70% de ZnO; b, c, d: Concentración de Zn 0,025 %, 0,050 %, 0,100 % respectivamente. *Para una densidad de 10000 plantas.ha⁻¹ y un volumen de aplicación de 0,2 L.árbol⁻¹.año⁻¹.

Fuente: Elaboración propia

La aplicación de los tratamientos vía foliar se realizó con un equipo de aspersión de presión previa retenida, con una boquilla TX-VK3, a una presión de 0,28 MPa, y un volumen de aplicación aproximado de 10 cm³/planta en el primer año y de 50 cm³ planta durante los años siguientes.

Se registró la producción anual y acumulada de café cereza, obtenida desde agosto de 2008 a diciembre de 2011 en El Rosario, desde febrero de 2009 hasta diciembre de 2011 en la CE Jorge Villamil y desde abril de 2010 a diciembre de 2012 en La FC El Troje; igualmente, se evaluó el factor de rendimiento en trilla⁴ en los pases de máxima producción anual en cada localidad.

Los datos se examinaron mediante un análisis de varianza al 5%, según el diseño experimental para cada sitio. Cuando el este análisis mostró efecto de los tratamientos, se aplicó la prueba de Dunnett al 5% para identificar cuales tratamientos eran diferentes al testigo. Si más de un tratamiento era diferente del testigo, ellos fueron comparados con la prueba de Tukey al 5% y solo en caso de que los tratamientos, por modo de aplicación (edáfico o foliar) eran diferentes que el testigo, se evaluó la tendencia lineal, cuadrática y cúbica de las dosis de Zn.

Para cada sitio, en forma compuesta por cada tratamiento, y en períodos que no coincidían con la aplicación de tratamientos, se tomaron muestras foliares del cuarto par de hojas de una rama productiva ubicada en el tercio medio del árbol, y se realizaron análisis foliares según los procedimientos descritos por [Carrillo, Mejía y Franco \(1994\)](#) dónde se determinaron los contenidos de nitrógeno por el método semimicro Kjeldahl; fósforo por el método colorimétrico (molibdo vanadato de amonio); potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre por el método de espectrofotometría de absorción atómica; y boro por colorimetría (azometina H). De igual forma se realizaron análisis de suelos cada año para evaluar cambios en el contenido de los macro y micronutrientes en el suelo, a partir de muestras compuestas por cada tratamiento.

Asumiendo como repeticiones las épocas de muestreo, se obtuvieron los promedios de las concentraciones foliares y los contenidos edáficos de zinc como respuesta a las dosis de zinc aplicadas en forma de óxido y quelato y en el programa Microsoft Excel se obtuvieron las líneas de tendencia correspondientes.

Así mismo, en el programa SAS se evaluó la tendencia lineal y cuadrática ($p \leq 0,05$) de las concentraciones foliares de zinc y los contenidos edáficos del mismo elemento como respuesta a las dosis de zinc aplicadas en forma de ZnO y quelato de zinc.

3. Resultados y Discusión

Efecto en la producción y el rendimiento en trilla

Durante los diferentes años de evaluación ([Figura 1](#)) no se encontró efecto de la aplicación de Zn sobre la producción de café en la EE El Rosario ni en la CE Jorge Villamil, mientras que en la FC El Troje se registraron diferencias significativas entre los tratamientos en la tercera cosecha (año 2012); al respecto, la prueba de comparación de Dunnett no evidenció diferencias con respecto al testigo. Este resultado concuerda con lo reportado por [Uribe y Salazar \(1981\)](#) quienes no evidenciaron respuesta en la producción anual.

Con respecto a la producción acumulada de café, al igual que en las cosechas anuales, tampoco se encontró efecto de los tratamientos en la EE El Rosario ni en la CE Jorge Villamil ([Figura 2](#)), lo cual concuerda con lo hallado por [Uribe y Salazar \(1981\)](#) y [Woods-Pedrosa et al. \(2013\)](#), quienes reportan falta de respuesta a la aplicación de Zn en el rendimiento del cultivo del café, en suelos que presentaban suficiencia en el contenido del elemento. Al respecto, cabe resaltar que las deficiencias de Zn en las plantas de café observadas al inicio de su desarrollo en los sitios del presente estudio pudieron estar más asociadas con el efecto del zoqueo y las condiciones de acidez del suelo.

En la FC El Troje se presentó efecto de los tratamientos en la producción acumulada, pero no se presentaron diferencias de estos con relación al tratamiento testigo según prueba de Dunnett al 5%, y los tratamientos 3 y 5 exhibieron menores producciones que el tratamiento 4 según prueba de Tukey al 5%. No se demostró tendencia lineal, cuadrática o cúbica entre las dosis para ambos tipos de fertilización (edáfica y foliar). En concordancia con los resultados obtenidos, en cultivos de café renovados por el método de zoca, en diferentes sitios de la región cafetera de Colombia, fue escasa la respuesta al inicio de la fertilización edáfica con NPK en los primeros doce a dieciocho meses del cultivo, lo anterior atribuido a la fisiología misma de la planta zoqueada, la pérdida de raíces de hasta un 60% en los primeros doce meses y la alta cantidad de biomasa en descomposición en el suelo producida por los residuos del cultivo después de la poda ([Salazar y Sadeghian, 2016](#)); razones adicionales para inferirse la nula respuesta a la fertilización con Zn encontrada en el presente estudio.

En cuanto al efecto de los tratamientos en el factor de rendimiento en trilla, el análisis de varianza reveló que en las tres localidades experimentales esta variable no se alteró por el suministro de Zn en ninguna de las dosis o formas de aplicación.

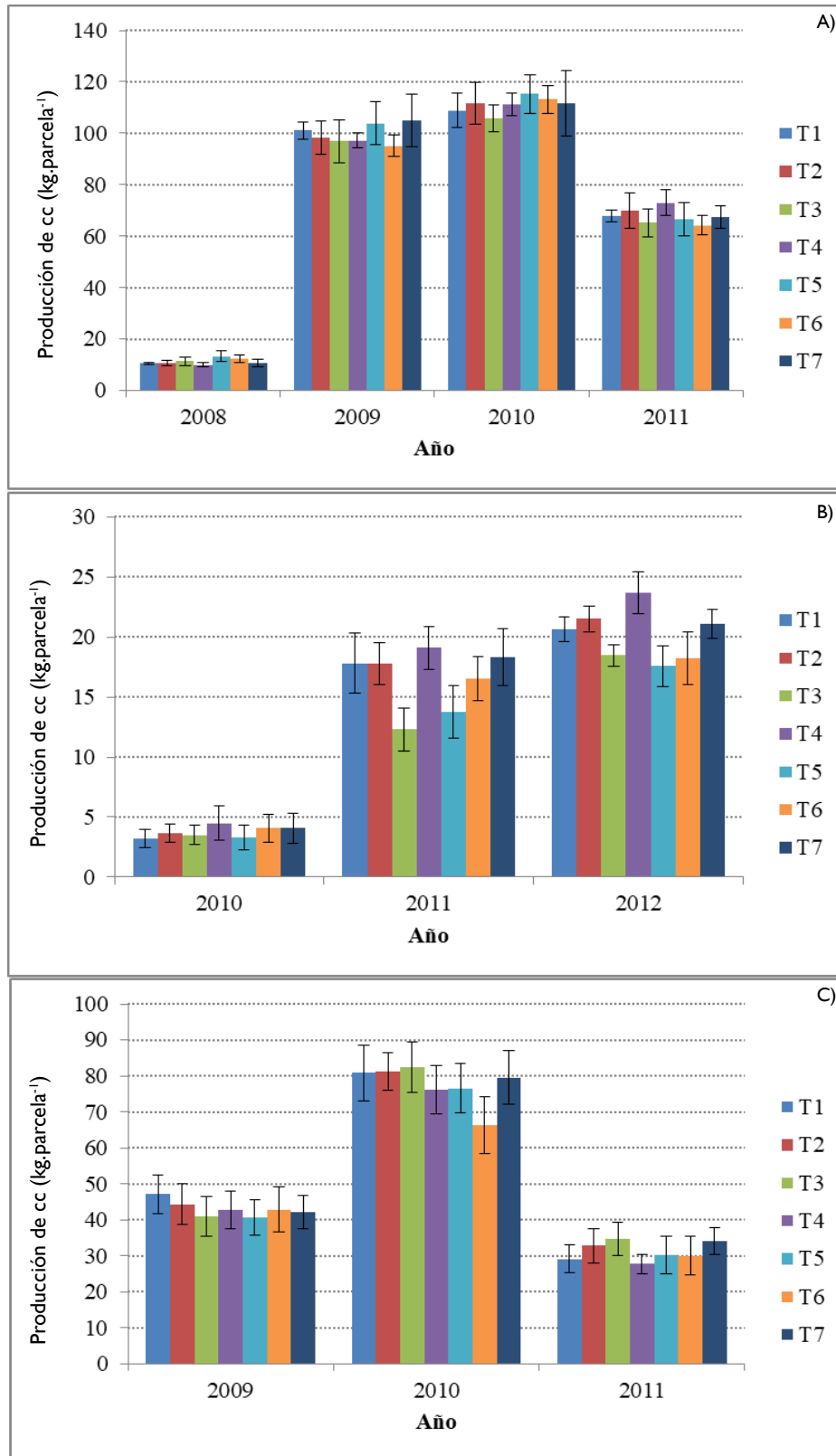


Figura 1. Producción anual de café cereza (cc) en respuesta a dosis y formas de aplicación de zinc. A) EE El Rosario, B) FC El Troje, C) CE Jorge Villamil. Las barras de error corresponden al error estándar
Fuente: Elaboración propia

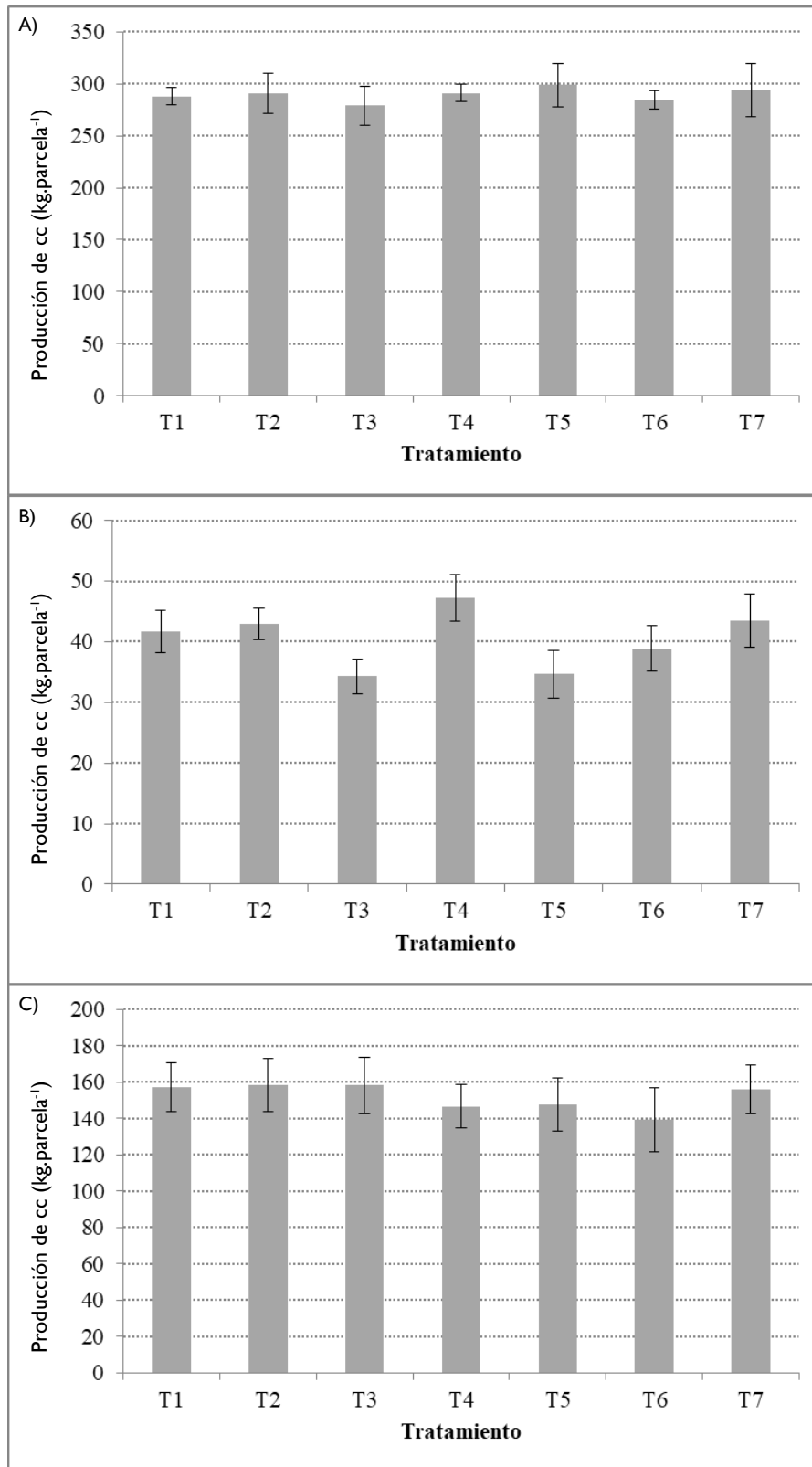


Figura 2. Producción acumulada de café cereza (cc) en respuesta a dosis y formas de aplicación de zinc. A) EE El Rosario, B) FC El Troje, C) CE Jorge Villamil. Las barras de error corresponden al error estándar. Fuente: Elaboración propia

Efecto sobre la concentración foliar de zinc

Se observó una tendencia lineal positiva en el aumento de los tenores foliares promedio de Zn asociado a las dosis de ZnO y Quelato de Zn en Gigante y El Rosario y una tendencia cuadrática en la Finca El Troje; este comportamiento en El Troje se relaciona con los contenidos promedio de Zn en el suelo que siguieron la misma tendencia como resultado de las dosis de ZnO (Figura 3) la cual puede relacionarse con el proceso de inmovilización en las fracciones de la materia orgánica del suelo y las condiciones de baja temperatura, alta humedad y baja radiación solar imperantes en este sitio que según [Havlin, Tisdale, Nelson y Beaton \(2013\)](#) ejercen en conjunto un efecto variable en la disponibilidad del Zn para las plantas.

Sin la aplicación de zinc, los tenores foliares de este elemento en las tres localidades se mantuvieron en el rango entre 8 y 9 mg.kg⁻¹ (Tabla 3), lo cual se encuentra dentro del rango crítico de este elemento para café (6 a 12 mg.kg⁻¹) ([Sadeghian, 2020](#)) y coincide con el límite de deficiencia (9 mg.kg⁻¹) reportado por [Valencia \(1999\)](#) para el cultivo de café, donde se asume que no se presentan deficiencias, ni efecto negativo significativo en la producción. De otro lado, ningún tratamiento de aplicación de zinc condujo a superar el nivel crítico de este elemento de 12 mg.kg⁻¹, como indicador de un consumo de lujo en el cultivo o niveles de toxicidad de este elemento. En forma descriptiva (Tabla 3), se observa como los tratamientos no tuvieron influencia en los tenores de los principales elementos al nivel foliar y en términos generales estuvieron dentro del rango adecuado para el cultivo del café según los criterios de [Valencia \(1999\)](#).

Al evaluar la tendencia lineal y cuadrática ($p \leq 0,05$) de las concentraciones foliares de zinc como respuesta a las dosis de zinc aplicadas en forma de ZnO y quelato de zinc, sólo se obtuvo respuesta significativa para Quelato de Zn en Gigante ($p \leq 0,05$) y en general, se observó que la aplicación de Zn vía edáfica incrementa los niveles de este elemento proporcionalmente a las dosis utilizadas en los tres suelos estudiados.

Efecto sobre el contenido de zinc en el suelo

Los contenidos de Zn en el suelo, sin la aplicación del elemento, permanecieron en niveles de 2, 8 y 10 mg.kg⁻¹ en CE Jorge Villamil, EE El Rosario y FC El Troje respectivamente (Figura 3), sin embargo, estuvieron por encima del límite de deficiencia (1 mg.kg⁻¹) reportado por [Valencia \(1999\)](#) para el cultivo de café, lo cual se expone como una de las razones para la ausencia de respuesta en la producción de café por efecto de los tratamientos. La aplicación de zinc vía fertilización edáfica incrementó de manera lineal los contenidos de este elemento en el suelo en Gigante y El

Rosario y con una tendencia cuadrática en la FC El Troje (Figura 3). El mayor valor promedio de este elemento en el suelo se alcanzó en la FC El Troje 60 mg.kg⁻¹, seguido por la EE El Rosario 48 mg.kg⁻¹ y la CE Jorge Villamil 35 mg.kg⁻¹ (Figura 3), las cuales se reportan dentro de niveles medios para los suelos a nivel mundial y que no causan toxicidad a los cultivos ([Yadav, Jain y Rai, 2010](#)), pues según [Alloway \(2009\)](#) los suelos cultivados tienen niveles promedio de Zn de 65 mg.kg⁻¹.

Según [Marschner \(1993\)](#) la disponibilidad del zinc en la solución se afecta por el pH del suelo, ya sea por valores bajos o altos del mismo y [Valencia \(1999\)](#) expone la necesidad de mantener el pH entre 5,0 a 5,5 para que la mayoría de micronutrientes estén en forma aprovechable por la planta de café. No obstante, en el caso de la CE Jorge Villamil y la EE El Rosario, se presentó pH de 4,5 a 4,3 respectivamente al inicio del estudio y a pesar de la aplicación de enmiendas permaneció en promedio entre 4,8 a 4,4 durante el tiempo que duró la investigación, mientras en La FC El Troje aunque la condición inicial de pH fue de 5,3, culminó con un pH entre 4,6 a 4,8 (Tabla 4), asociado con la naturaleza ácida de los suelos derivados de ceniza volcánica de la EE El Rosario y la FC El Troje y de origen sedimentario de la CE Jorge Villamil, que no reflejaron una relación estrecha entre el pH y la disponibilidad de Zn.

En forma descriptiva (Tabla 4), se observa como los tratamientos no tuvieron influencia sobre las principales propiedades químicas de los suelos a excepción de los contenidos de Zn y en términos generales estuvieron dentro del comportamiento esperado para el cultivo del café propio de cada suelo y localidad según los criterios de [Sadeghian \(2008\)](#).

4. Conclusiones

La fertilización con zinc en el cultivo de café en las dos formas de aplicación modificó el contenido foliar y edáfico de este nutriente. No obstante, para las condiciones del estudio la aplicación de zinc, tanto edáfica en forma de óxido de Zn como foliar con Quelato de Zinc, no tuvo efectos positivos en la producción de café cereza y no afectó el factor de rendimiento en trilla.

En sitios donde se observen deficiencias de Zn, estas pueden corregirse a corto plazo con la aplicación foliar de 1 kg.ha⁻¹ de Quelato de Zn y a largo plazo con la aplicación edáfica de 3-5 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de ZnO, los cuales serán suficientes para mantener los niveles de Zn en el suelo en niveles óptimos y suplir los requerimientos de Zn removidos en una cosecha de café. ≡

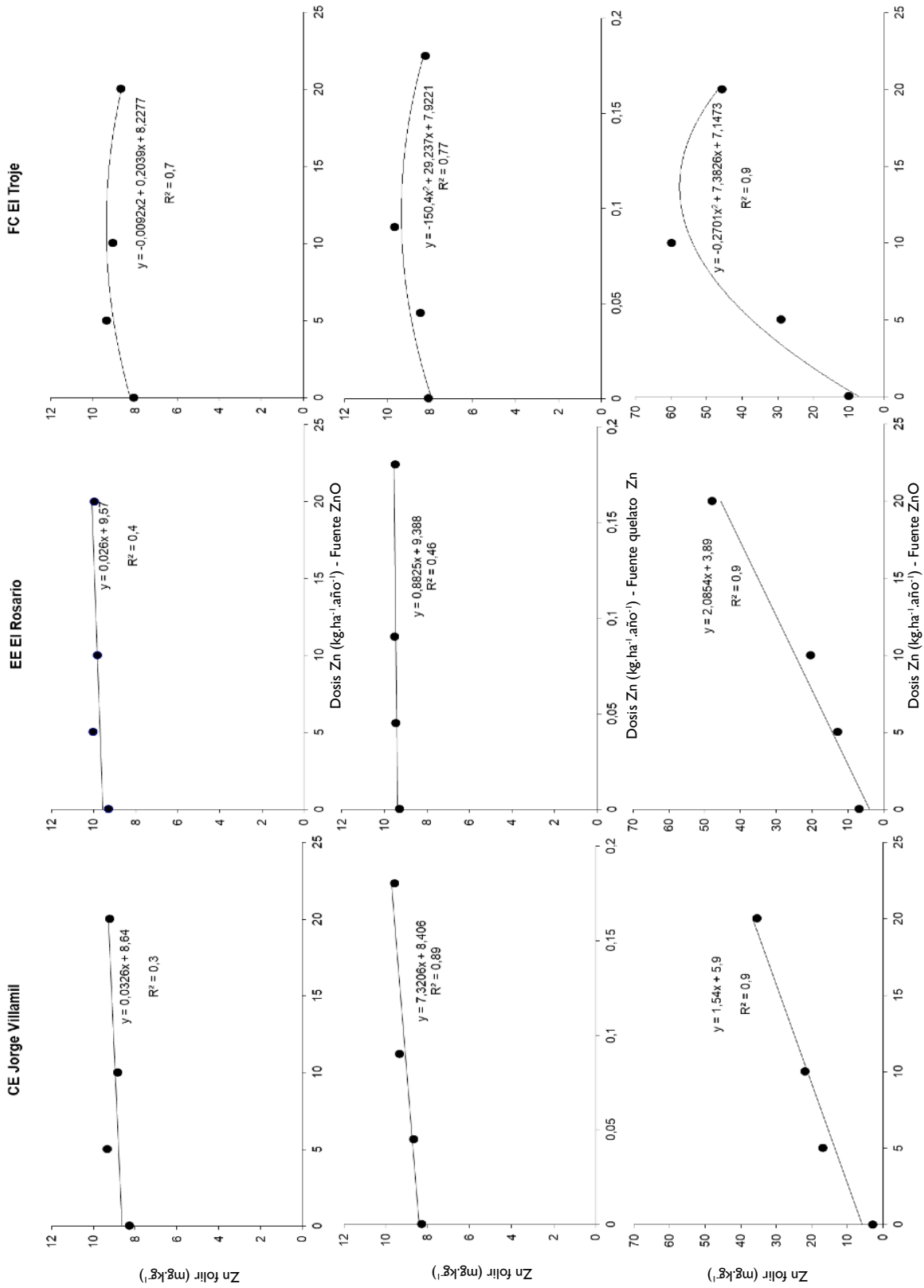


Figura 3. Concentración de zinc foliar y contenido en el suelo en respuesta a dosis de Zn aplicado en forma foliar y edáfica.
Fuente: Los autores

Tabla 3.
Valores promedio y de error estándar de los contenidos foliares con relación a los tratamientos

Trata	n	N	P	K	Ca	Mg	CENIZAS	Fe	Cu	Mn	Zn	B											
%																							
CE Jorge Villamil																							
T1	8	2,7	±0,1	0,16	±0,01	2,1	±0,1	1,0	±0,1	0,2	±0,02	7,2	±0,2	70,7	±8,2	15,2	±1,8	1029,5	±66,7	9,3	±0,5	32,7	±2,1
T2	8	2,6	±0,1	0,15	±0,01	1,9	±0,1	0,9	±0,1	0,2	±0,02	6,9	±0,2	62,1	±4,8	13,1	±1,3	1055,7	±97,2	8,8	±0,5	35,2	±3,1
T3	8	2,6	±0,1	0,15	±0,01	2,1	±0,1	1,0	±0,1	0,2	±0,01	7,3	±0,2	66,4	±5,3	14,1	±1,3	1217,8	±107,9	9,2	±0,4	38,4	±2,6
T4	8	2,6	±0,1	0,15	±0,01	2,0	±0,1	0,9	±0,1	0,2	±0,02	6,8	±0,2	63,4	±6,8	12,5	±1,0	1035,2	±138,4	8,7	±0,3	34,6	±2,9
T5	8	2,7	±0,1	0,16	±0,01	2,0	±0,1	0,9	±0,1	0,2	±0,02	6,9	±0,3	68,4	±6,3	13,0	±1,1	1022,7	±125,4	9,4	±0,5	32,2	±2,6
T6	8	2,7	±0,1	0,16	±0,01	2,0	±0,1	0,9	±0,1	0,2	±0,02	7,0	±0,2	67,6	±7,1	13,6	±1,3	1132,1	±111,6	9,6	±0,6	35,6	±2,2
T7	8	2,7	±0,1	0,16	±0,01	2,0	±0,1	0,9	±0,1	0,2	±0,02	7,1	±0,2	65,2	±5,9	12,9	±1,6	1160,9	±106,6	8,3	±0,2	37,0	±2,4
EE El Rosario																							
T1	11	2,8	±0,1	0,16	±0,01	1,8	±0,2	0,9	±0,1	0,3	±0,02	6,5	±0,3	60,4	±2,7	10,3	±1,1	113,6	±12,7	10,0	±0,9	37,4	±3,8
T2	11	2,8	±0,1	0,16	±0,01	1,8	±0,2	1,0	±0,1	0,3	±0,02	6,7	±0,4	61,4	±3,0	9,6	±0,6	119,6	±11,3	9,8	±0,8	39,4	±3,0
T3	11	2,8	±0,1	0,16	±0,01	1,8	±0,1	0,9	±0,0	0,3	±0,02	6,6	±0,4	58,1	±2,3	10,1	±0,7	105,4	±12,4	10,0	±0,5	36,8	±2,7
T4	15	2,8	±0,1	0,16	±0,01	1,9	±0,1	0,9	±0,0	0,3	±0,01	6,7	±0,3	76,5	±7,4	12,3	±1,2	158,5	±14,2	9,5	±0,4	39,0	±3,1
T5	15	2,7	±0,1	0,16	±0,01	1,8	±0,2	0,8	±0,1	0,3	±0,02	6,6	±0,3	74,8	±10,5	10,7	±1,0	136,1	±12,4	9,5	±0,4	41,2	±4,6
T6	15	2,8	±0,1	0,16	±0,01	1,8	±0,1	0,9	±0,0	0,3	±0,01	6,6	±0,3	74,6	±7,3	12,3	±1,3	146,2	±13,1	9,5	±0,4	36,5	±2,6
T7	15	2,7	±0,1	0,15	±0,01	1,8	±0,2	0,9	±0,0	0,3	±0,01	6,6	±0,3	77,0	±8,3	11,6	±0,7	148,5	±19,2	9,3	±0,7	35,1	±3,7
FC El Troje																							
T1	4	2,9	±0,2	0,15	±0,03	1,7	±0,2	0,8	±0,2	0,3	±0,05	6,1	±0,7	75,8	±13,1	15,1	±0,9	283,5	±122,8	9,4	±2,3	25,7	±4,5
T2	4	2,9	±0,2	0,15	±0,02	1,7	±0,2	0,8	±0,2	0,3	±0,05	6,0	±0,7	75,2	±11,3	14,5	±0,5	271,9	±119,3	9,1	±1,8	24,8	±4,2
T3	4	2,9	±0,2	0,14	±0,02	1,6	±0,2	0,9	±0,2	0,3	±0,05	6,0	±0,8	74,9	±12,9	14,5	±0,5	293,8	±128,1	8,7	±1,6	28,6	±5,7
T4	4	2,9	±0,2	0,15	±0,02	1,7	±0,1	0,8	±0,2	0,3	±0,04	6,0	±0,7	74,3	±12,0	14,7	±0,6	316,3	±138,5	8,5	±1,5	24,8	±5,5
T5	4	2,9	±0,2	0,14	±0,02	1,7	±0,1	0,8	±0,2	0,3	±0,05	6,3	±0,7	90,5	±15,6	15,0	±0,7	287,7	±108,5	9,7	±2,3	25,2	±4,8
T6	4	2,9	±0,2	0,15	±0,02	1,7	±0,1	0,8	±0,1	0,3	±0,05	6,0	±0,6	79,7	±16,0	14,4	±0,8	268,4	±99,8	8,3	±1,5	24,8	±4,8
T7	4	2,8	±0,2	0,15	±0,02	1,6	±0,1	0,8	±0,1	0,3	±0,04	5,9	±0,6	115,6	±37,2	14,7	±0,9	310,8	±121,8	8,1	±1,4	25,3	±4,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.

Resultados de los análisis de suelos al inicio antes de aplicar los tratamientos (*) y cuatro años después (**)

Trata	pH	MO	K	Ca	cmol _c .kg ⁻¹				CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	B													
					Mg	Al	AI	AI																				
	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*													
		%																										
CE Jorge Villamil																												
T1	4,4	4,3	4,1	3,8	0,4	0,3	0,5	1,4	0,3	0,3	2,1	1,2	8,0	9,0	104	106	587	873	97	110	3,0	5,0	3,0	3,0	3,0	0,8	0,4	
T2	4,3	4,3	4,5	3,7	0,5	0,4	0,6	1,5	0,3	0,3	2,2	1,3	10,0	8,0	133	117	646	742	57	95	3,0	10,0	3,0	4,0	3,0	4,0	1,0	0,5
T3	4,3	4,2	3,8	3,0	0,4	0,3	0,5	1,4	0,3	0,3	1,9	1,2	8,0	9,0	104	104	602	777	68	95	3,0	17,0	3,0	3,0	3,0	1,0	0,7	
T4	4,3	4,2	4,6	3,5	0,4	0,4	0,5	1,4	0,3	0,3	2,2	1,4	10,0	12	130	101	693	880	77	97	3,0	3,0	4,0	3,0	1,0	0,4		
T5	4,3	4,4	4,2	3,4	0,4	0,3	0,5	1,5	0,3	0,3	2,0	1,0	10,0	10	125	91	556	583	65	109	3,0	3,0	3,0	3,0	1,0	0,4		
T6	4,3	4,3	4,2	3,5	0,4	0,4	0,4	1,6	0,3	0,3	2,1	1,1	8,0	12	90	107	585	719	99	102	3,0	4,0	3,0	3,0	0,7	0,5		
T7	4,3	4,1	4,1	4,0	0,4	0,3	0,5	1,1	0,3	0,3	2,0	1,5	8,0	12	118	139	635	855	98	84	3,0	4,0	3,0	3,0	0,7	0,5		
EEEI Rosario																												
T1	4,4	4,7	13,0	12,3	1,1	0,9	1,8	2,8	0,8	0,6	6,6	4,9	32	24	75	45	573	471	16	6	7	12,4	2,0	1,2	0,5	0,4		
T2	4,5	4,7	14,0	10,9	1,4	1,0	2,9	3,2	0,9	0,9	5,8	4,7	30	23	104	33	1045	509	18	8	4	24,4	2,0	1,4	0,5	0,4		
T3	4,4	4,7	13,9	12,0	1,3	1,2	2,4	4,5	1,0	1,2	6,4	4,3	37	30	94	42	958	449	17	7	5	45,4	2,0	1,3	0,7	0,4		
T4	4,3	4,8	13,3	11,2	1,5	1,2	1,9	3,7	0,8	0,8	7,2	4,3	32	35	85	36	640	367	23	7	6	4,2	2,0	1,0	0,7	0,4		
T5	4,4	4,8	13,0	10,6	1,2	0,8	2,1	4,1	0,9	1,3	7,1	3,7	31	31	78	34	689	427	20	9	7	6,6	2,0	2,3	0,8	0,3		
T6	4,3	4,7	12,7	10,9	1,2	0,7	1,8	3,1	0,9	0,8	6,9	4,9	32	31	77	27	1187	412	17	8	3	5,3	2,0	1,3	0,6	0,4		
T7	4,5	4,7	14,2	10,4	1,1	1,0	2,3	3,4	0,9	1,1	5,5	4,5	33	30	59	22	623	401	22	10	7	7,0	2,0	1,9	0,7	0,3		
FCEI Troje																												
T1	5,3	4,7	12,1	9,0	2,1	1,6	5,8	2,1	3,5	0,7	0,5	1,7	23	21	46	33	737	772	86	90	13	48,8	7,0	7,6	1,1	0,4		
T2	5,3	4,6	12,6	9,8	2,0	1,5	5,6	1,9	3,4	0,6	0,5	2,0	25	25	38	22	708	677	77	66	12	114,0	6,0	7,9	1,2	0,4		
T3	5,2	4,8	11,6	9,7	2,2	1,7	5,5	2,3	3,3	0,7	0,5	1,7	23	21	16	27	787	678	86	77	12	87,0	7,0	7,4	1,5	0,4		
T4	5,5	4,6	11,8	9,4	2,2	1,5	6,9	2,0	3,5	0,6	0,4	1,9	23	20	39	33	728	718	81	72	16	26,4	7,0	6,9	1,4	0,5		
T5	5,4	4,7	13,2	10,3	2,1	1,4	6,0	1,3	3,5	0,4	0,5	2,2	24	26	16	25	669	698	82	64	11	16,9	6,0	6,5	0,7	0,5		
T6	5,3	4,6	12,4	10,1	2,1	1,6	5,6	1,6	3,2	0,6	0,5	2,4	25	29	11	24	741	730	80	69	12	28,2	7,0	6,7	1,3	0,4		
T7	5,1	4,7	12,3	9,1	1,8	1,7	4,5	1,9	2,8	0,6	0,7	1,9	24	26	16	18	845	721	73	88	11	9,6	7,0	7,2	1,2	0,3		

Fuente:Elaboración propia

Notas

1. cps: café pergamino seco.
2. Un saco de café: 60 kg de café almendra tipo exportación.
3. Mitaca o travesía: Cosecha de café secundaria o de menor importancia que la principal.
4. Factor de rendimiento en trilla: Cantidad de café pergamino necesario para obtener un saco de 70 kg de café excelso, tipo exportación, que se determina durante el proceso de trilla.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ALLOWAY, Brian J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. In: Environmental Geochemistry and Health. 2009. vol. 31, p. 537-548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>
2. ANTONIALLI, L.; REIS, A.; VEIGA, R.; SILVA, J. Análise econômica sobre adubação com sulfato de zinco via foliar na produção do café (Coffea arabica L.). Em: Ciência e Prática. 1988. vol. 12, no. 1, p. 99-110.
3. BARROW, N Jim. Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. In: ROBSON, Alan D. (Ed) Zinc in Soils and Plants. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 15-32. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_2
4. CARRILLO PACHÓN, Ignacio Federico; MEJÍA M, Beatriz; FRANCO ÁLVAREZ, Héctor Fernando. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná: Cenicafé, 1994. 52 p.
5. COSTA, C.; SANTINATO, R.; FIGUEIRA, V. Eficiência de adubo foliar formulado no fornecimento dos micronutrientes Zinco e Boro em comparação de sais na cultura do café. En: 18 Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. Araxá: PROCAFE/EMBRAPA, 1992. p. 65-67.
6. CLOTEEA, Karen J.; ŠMITB, Žiga; MINNIS NDIMBAA, Roya; VAVPETIČB, Primož; DU PLESSISD, Antun; LE ROUXD, Stephan G.; PELICONB, Primož. Physico-elemental analysis of roasted organic coffee beans from Ethiopia, Colombia, Honduras, and Mexico using X-ray micro-computed tomography and external beam particle induced X-ray emission. In: Food Chemistry: X. 2019. vol. 2, no. 30, p. 100032. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100032>
7. FONSECA, Carlos; OBANDO, Juan José. Evaluación de diferentes dosis de sulfato de Zinc aplicados al suelo y fuentes de Zinc foliares en dos zonas cafetaleras de Costa Rica. En: XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura. Memorias. San José de Costa Rica: Instituto Costarricense de Café (Icafé), 2000. p. 203-211. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/10704/BVE20077987e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. HAVLIN, John L.; TISDALE, Samuel L.; NELSON, Werner L.; BEATON, James D. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 8 ed. New Jersey: Pearson Upper Saddle River, 2013. 528 p.
9. MARSCHNER, Petra. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 2012. 889 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
10. MARSCHNER, Horst. Zinc Uptake from Soils. In: ROBSON, Alan D. (Ed.) Zinc in Soils and Plants. Dordrecht: Springer, 1993. Developments in Plant and Soil Sciences, vol. 55. p. 59-77. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_5
11. MARUBAYASHI, O.M.; PEDROSO, P.A.C.; VITTI, G.C. COSTA, W.M. Efeito de fontes e formas de aplicação de boro e zinco na cultura do cafeeiro. Em: Científica, São Paulo. 1994. vol. 22, no. 2, p. 289-299.
12. MELO, Edmundo de; GUIMARÃES, Paulo; SILVA, Enilson; NOGUEIRA, Francisco. Efeito da aplicação foliar de sulfato de zinco na produção do cafeeiro (Coffea arabica L.). Em: Ciência e Agrotecnologia. 1999. vol. 23, no. 1, p. 84-85. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/33130>
13. SADEGHIAN KHALAJABADI, Siavosh. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. Boletín Técnico Cenicafé. 2008. no. 32, 44 p.
14. SADEGHIAN KHALAJABADI, Siavosh. Análisis foliar: Una guía para evaluar el estado nutricional del café. En: Avances Técnicos Cenicafé. 2020. vol. 515, p 1-4. <https://doi.org/10.38141/10779/0515>
15. SADEGHIAN KHALAJABADI, Siavosh; SALAMANCA JIMENEZ, Alveiro. Micronutrientes en frutos y hojas de café. En: Revista Cenicafé. 2015. vol. 66, no. 2, p. 73-87. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Micronutrientes.pdf>
16. SADEGHIAN KHALAJABADI, Siavosh; MEJÍA MUÑOZ, Beatriz; ARCILA PULGARIN J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. En: Revista Cenicafé. 2006. vol. 57, no. 4, p. 251-261. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057\(04\)251-261.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057(04)251-261.pdf)
17. SALAZAR GUTIERREZ, Luis Fernando; SADEGHIAN KHALAJABADI, Siavosh. Respuesta del café (Coffea arabica L.) a la fertilización antes y después de la zoca. En: Revista Cenicafé. 2016. vol. 67, no. 1, p. 81-93. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/681/1/arc067%2801%2981-93.pdf>
18. SOUSA, Sérgio Felipe; LOPES, Ana Branca, FERNANDES, Pedro Alexandrino; RAMOS, Maria João. The zinc proteome: a tale of stability and functionality. In: Dalton Transactions. 2009. vol. 38. p. 7946-7956. <https://doi.org/10.1039/B904404C>
19. URIBE HENAO Alfonso; SALAZAR ARIAS, José Nestor. Efecto de los elementos menores en la producción de café. En: Revista Cenicafé. 1981. vol. 32. p. 122-142.
20. VALENCIA ARISTIZÁBAL, Germán. Fisiología nutrición y fertilización del café. Chinchiná: Agroinsumos del café S.A, Cenicafé, 1999. 94 p.
21. WOODS PEDROSA, Adriene; PRIETO MARTINEZ, Herminia Emilia; CRUZ, Cosme Damião.; DAMATTA, Fabio Murillo; CLEMENTE, Junia Maria. Crescimento de cultivares de café em resposta a doses contrastantes do zinco. Em: Coffee Science, Lavras. 2013. vol. 8, no. 3, p. 295-305. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/7983>
22. YADAV, D.V.; JAIN, Rhada; RAI, R.K. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. In: SHERAMETI, I.; VARMA, A. (eds.). Soil Heavy Metals. Verlag: Springer, 2010. Soil Biology. vol. 19. p. 339-367. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_16