



Contenido de micronutrientes en un suelo Inceptisol bajo cultivo de cacao, maíz y bosque

Micronutrient content in an Inceptisol soil under cocoa, corn and forest cultivation

Teor de micronutrientes em solo de Inceptisol sob cultivo de cacau, milho e floresta

Mireya del Rocío Guamán-Naula^I

mguaman9@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-1801-7349>

Irán Rodríguez-Delgado^{II}

irodriguez@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6453-2108>

Hipólito Israel Pérez-Iglesias^{III}

hperez@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-3368-8716>

Salomón Alejandro Barrezueta-Unda^{IV}

sabarrezueta@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4147-9284>

Correspondencia: mguaman9@utmachala.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 27 de noviembre de 2024 * **Aceptado:** 02 de diciembre de 2024 * **Publicado:** 20 de enero de 2025

- I. Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- III. Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

Resumen

La agricultura es la actividad principal de los pequeños productores, aportando alimentos para la sociedad, con el crecimiento de la población ha ido aumentando la deforestación, lo cual provoca que estos suelos se deterioran, perdiendo la biodiversidad y el inadecuado uso de los recursos naturales siendo los principales factores que afectan a la producción agrícola a nivel mundial. La siguiente investigación tiene como objetivo determinar el efecto de los cultivos de cacao, maíz y bosque en el contenido de micronutrientes de un suelo Inceptisol en el agroecosistema de la granja Santa Inés, cantón Machala, provincia de El Oro, Ecuador. Para lo cual se realizaron tres calicatas en puntos permanentes y se tomaron muestras de suelo de 1 kg a una profundidad de 0-30 cm del perfil de suelo. Se demostró el efecto de los diferentes cultivos en el contenido de micronutrientes y se evidencia que en el agroecosistema de maíz el uso continuado e intensivo del recurso natural contribuyen a su disminución en relación con cacao y bosque, donde no se realiza un manejo intensivo.

Palabras clave: agroecosistema; hierro; manganeso; cobre; zinc; boro; azufre.

Abstract

Agriculture is the main activity of small producers, providing food for society. With population growth, deforestation has increased, which causes these soils to deteriorate, losing biodiversity and the inadequate use of natural resources being the main factors that affect agricultural production worldwide. The following research aims to determine the effect of cocoa, corn and forest crops on the micronutrient content of an Inceptisol soil in the agroecosystem of the Santa Inés farm, Machala canton, El Oro province, Ecuador. For this, three test pits were made at permanent points and 1 kg soil samples were taken at a depth of 0-30 cm from the soil profile. The effect of the different crops on the micronutrient content was demonstrated and it is evident that in the corn agroecosystem the continued and intensive use of the natural resource contributes to its decrease in relation to cocoa and forest, where intensive management is not carried out.

Keywords: agroecosystem; iron; manganese; copper; zinc; boron; sulfur.

Resumo

A agricultura é a principal atividade dos pequenos produtores, fornecendo alimentos à sociedade agrícola mundial. A seguinte pesquisa tem como objetivo determinar o efeito do cacau, do milho e das culturas florestais no teor de micronutrientes de um solo de Inceptisol no agroecossistema da fazenda Santa Inés, cantão de Machala, província de El Oro, Equador. Para tal, foram cavadas três covas de ensaio em pontos permanentes e recolhidas amostras de solo de 1 kg a uma profundidade de 0-30 cm do perfil do solo. Foi demonstrado o efeito das diferentes culturas no teor de micronutrientes e é evidente que no agroecossistema do milho a utilização contínua e intensiva do recurso natural contribui para a sua diminuição em relação ao cacau e às florestas, onde não é realizado um manejo intensivo.

Palavras-chave: agroecossistema; ferro; manganês; cobre; zinco; boro; enxofre.

Introducción

La agricultura ha sido una actividad fundamental para el desarrollo de la humanidad a lo largo de la historia, es una de las actividades socioeconómicas de mayor importancia en el mundo realizada por pequeños productores, los cuales aportan entre el 50 % y el 75 % de los alimentos consumidos a nivel global. Además, es la única fuente de ingresos para el 70 % de los pobres de las zonas rurales del mundo (Chavarría & Estrada, 2023).

La agricultura es una de las actividades que más alteraciones y pérdidas provoca en la fauna de los artrópodos del suelo. Estos artrópodos son fundamentales en los agroecosistemas, ya que desempeñan un papel crucial en el procesamiento de los recursos vegetales, el ciclo de nutrientes y la red alimentaria (Livia et al., 2020).

La producción de alimentos es cada día más difícil en el mundo, ya que cosas como el cambio climático, la desertificación y especialmente la degradación del suelo afectan esta tarea en todo el mundo, provocando inseguridad alimentaria. Para lograr la seguridad alimentaria es necesario tener en cuenta los recursos naturales, humanos y de infraestructura existentes. Los medios de vida de millones de personas en todo el mundo dependen directa o indirectamente de la agricultura. En la actualidad, la agricultura se ha convertido en un centro de actividad comercial para la expansión e intercambio de productos (Vera et al., 2019).

El uso del suelo con fines agrícolas ha evolucionado desde la agricultura tradicional hacia los sistemas de producción modernos, que son parte importante de los sistemas agrícolas, analizados

y gestionados por el ser humano con el objetivo de maximizar el rendimiento de los cultivos. No obstante, el uso excesivo de los suelos, la incorrecta gestión de los sistemas de riego y las prácticas agrícolas ineficientes han resultado en la degradación edáfica, y provocando el deterioro de estos recursos naturales en múltiples regiones a nivel global (Montatixe & Eche, 2021).

El suelo es un recurso natural no renovable, dinámico y multifuncional, constituido por plantas, animales, macro y microorganismos. No obstante, la práctica de manejo continúa introducidas a fin de aumentar el rendimiento han cambiado sus características físicas, químicas y biológicas con el paso del tiempo. El 33 % del suelo a escala mundial está moderada o gravemente degradado debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación y contaminación (Llanga et al., 2023).

Según Ramos (2017), la mayoría de los suelos han tenido un proceso de formación único y específico, que lo hace particular, los suelos de orden Inceptisol se caracteriza por presentar una evolución moderada, estos suelos se originan a partir de una combinación de meteorización de diversos materiales parentales, procesos de erosión en terrenos con pendientes, condiciones climáticas y la interacción con la vegetación es fundamental para su formación y evolución. Los suelos Inceptisol abarcan una extensa superficie a nivel mundial, estando presentes en los cinco continentes existentes. Cabe destacar la gran área que ocupan los suelos del orden Inceptisol en China y el sur de Europa.

Los suelos del orden Inceptisol se conocen por ser relativamente jóvenes y se encuentran en zonas tropicales y subtropicales, suelen tener un bajo contenido de materia orgánica y baja capacidad de retención de nutrientes, entonces que los hace propensos a tener niveles bajos en macronutrientes y micronutrientes, tienen márgenes débiles debido a la actividad agrícola continua, lo que afecta el crecimiento y desarrollo de los cultivos, cacao, maíz y bosque.

Los suelos pertenecientes al orden Inceptisol, aunque presentan una capacidad moderada de retención de nutrientes, requieren una atención especial en la gestión de micronutrientes para asegurar la productividad de los cultivos. Los componentes minerales necesarios para el desarrollo y el metabolismo de las plantas se denominan nutrientes. Son elementos esenciales que cumplen determinadas funciones en la planta, y sin obstaculizar el desarrollo de procesos biológicos, no existe ningún elemento que pueda ser sustituido (Barahonas et al., 2019).

Los Inceptisoles son suelos en etapas iniciales de desarrollo, presentan un gran potencial agrícola a pesar de sus limitaciones inherentes. Su fertilidad natural, especialmente en cuanto a

micronutrientes, suele ser variable y, en muchos casos, insuficiente para garantizar altos rendimientos y calidad en los cultivos. La deficiencia de elementos como hierro, zinc, cobre y boro es un problema común en estos suelos, lo que limita la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal y puede reducir significativamente la producción.

Los micronutrientes son elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, desempeñan funciones clave como catalizadores enzimáticos, componentes de la clorofila y factores que fortalecen los tejidos vegetales. Desempeñan funciones clave en procesos como la fotosíntesis y la respiración, su disponibilidad en el suelo puede verse involucrado por diversos factores, como el pH, la materia orgánica y la presencia de otros elementos (Baca et al., 2010). Las deficiencias de micronutrientes en el orden Inceptisol pueden manifestarse a través de síntomas como clorosis, necrosis y reducción del crecimiento, lo que a su vez afecta la productividad agrícola.

Los cultivos como el cacao es el tercer cultivar en importancia después del café y la caña de azúcar a nivel mundial y representa una fuente de ingresos para el país, la mayoría de los productores son agricultores los que llevan un manejo asociado con los árboles (Barrezueta, 2019).

La relevancia de los micronutrientes en el cacao es fundamental: sin azufre, las proteínas no podrían formarse. El calcio es esencial para la estructura de las paredes celulares. El zinc, el manganeso y el molibdeno son cruciales para la producción de enzimas, acelerando procesos químicos y bioquímicos vitales en las plantas. El magnesio es indispensable para la formación de la clorofila, aprovechando la energía luminosa que impulsa la fotosíntesis. En la polinización y fecundación, el boro es crucial para el crecimiento del tubo polínico, permitiendo la fecundación del óvulo y la formación de granos de cacao.

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta originaria de América, cuyo producto es uno de los granos básicos que alimentan a la humanidad, el más importante del mundo (Muñoz et al., 2022). Además, el maíz en suelo Inceptisol es afectado por la degradación del suelo, la pérdida de la biodiversidad y el inadecuado uso de los recursos naturales afectando la producción agrícola (Rodríguez et al., 2022).

Los micronutrientes como el zinc, manganeso, cobre, hierro y boro son esenciales para el desarrollo óptimo del maíz, ya que influyen en procesos clave como la síntesis de proteínas, la fotosíntesis y la tolerancia al estrés. La deficiencia de zinc puede provocar el acortamiento de los entrenudos y una apariencia de "roseta", así como frutos pequeños; la falta de manganeso causa clorosis

intervenal y manchas necróticas; el déficit de cobre genera enanismo y una notable reducción en el rendimiento; mientras que la carencia de hierro se manifiesta como clorosis en las hojas jóvenes. Además, el boro es vital para el desarrollo celular y la polinización. En conjunto, estos micronutrientes son fundamentales para garantizar un crecimiento saludable del cultivo y mantener su valor nutricional, ya que su deficiencia puede tener efectos adversos significativos sobre el crecimiento y rendimiento en el cultivo de maíz.

Los suelos de orden Inceptisol son adecuados para el cultivo de cacao, maíz y bosques, aunque cada uno de estos usos afecta de manera distinta las propiedades químicas del suelo. El cultivo de cacao y los bosques promueven la acumulación de materia orgánica y nitrógeno, mientras que el cultivo de maíz tiende a reducir estos nutrientes debido a su alta demanda y al excesivo trabajo del suelo.

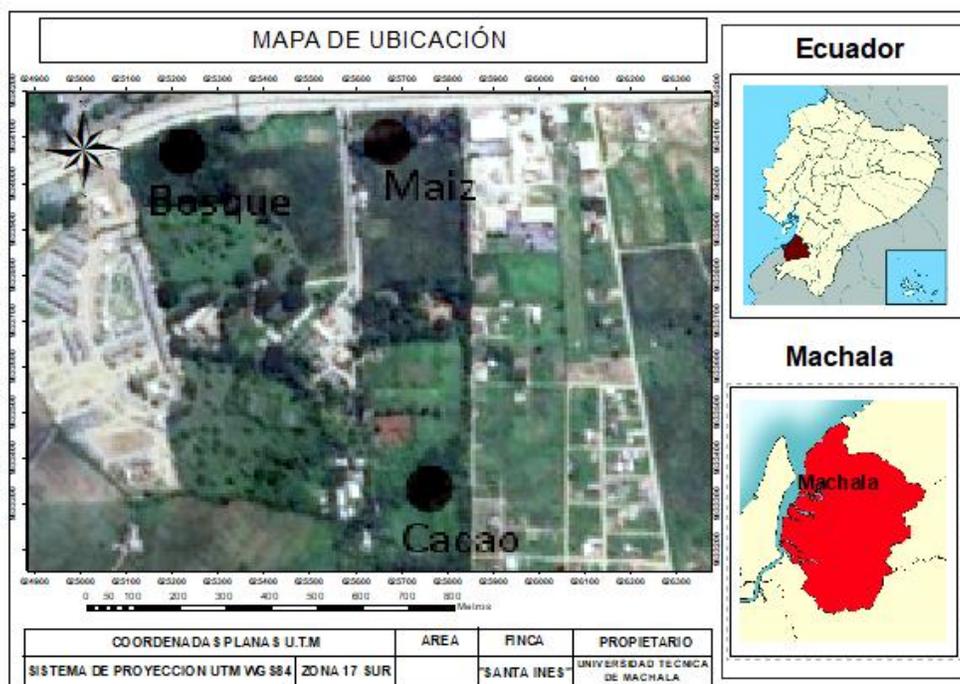
El objetivo de la investigación fue determinar el efecto de los cultivos de cacao, maíz y bosque en el contenido de micronutrientes Hierro (Fe), Manganese (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Boro (B) y Azufre (S), a una profundidad de 0-30 cm en un suelo Inceptisol en la granja Santa Inés.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en la granja Santa Inés, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Machala, ubicada en el km 5½ vía Panamericana, parroquia El Cambio, cantón Machala, provincia de El Oro, Ecuador; se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 03°17'16" de latitud Sur y 79°54'05" de longitud oeste, a una altitud de 5 msnm. El suelo de la zona analizada pertenece al orden Inceptisol, con temperaturas medias superiores a los 24°C, precipitaciones anuales entre 500 y 1000 mm; y una heliofanía promedio anual de 3,4 horas por día (Rodríguez et al., 2022) (Figura 1).

Fig. 1: Mapa de ubicación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Diseño del estudio

Para el estudio se seleccionaron tres agroecosistemas productivos de cacao, maíz y bosque, donde se establecieron puntos de muestreo aleatorios, georreferenciados con GPS y donde se realizaron tres calicatas. La toma de muestras se realizó a una profundidad de 0-30 cm del suelo.

Las muestras de suelo de 1 kg a una profundidad de 0-30 cm utilizando pala y espátula, en los agroecosistemas de cacao (5,98 ha), maíz (1,74 ha) y bosque (2,43 ha). Las muestras, tras ser homogenizadas, se almacenaron en fundas identificadas y se enviaron al laboratorio de suelos, foliares y aguas en Tumbaco, Quito, perteneciente a la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD).

El tipo de estudio es observacional, transversal y analítico en el cual se caracterizaron tres agroecosistemas de cacao, maíz y bosque.

VARIABLES A MEDIR Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación, se llevaron a cabo análisis de los micronutrientes: Fe, Mn, Cu, Zn, B y S, en los distintos agroecosistemas de cacao, maíz y bosque.

Tabla 1: Métodos utilizados en Laboratorio para las determinaciones analíticas de las variables.

Variabes	Método	U/M
Fe	Absorción atómica	mg/kg de suelo
Cu	Absorción atómica	mg/kg de suelo
Mn	Absorción atómica	mg/kg de suelo
Zn	Absorción atómica	mg/kg de suelo
B	Absorción atómica	mg/kg de suelo
S	Absorción atómica	mg/kg de suelo

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento estadístico

Para determinar si existen o no diferencias estadísticas significativas entre las medias de las variables estudiadas, como: Fe (mg/kg de suelo), Mn (mg/kg de suelo), Cu (mg/kg de suelo), Zn (mg/kg de suelo), B (mg/kg de suelo) y S (mg/kg de suelo), en relación con los sistemas agrícolas cacao, maíz y bosque, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor Inter grupos. Esto se realizó después de verificar los requisitos de independencia de las observaciones, normalidad de datos y homogeneidad de varianzas. Cuando se presentarán diferencias estadísticas entre los sistemas de producción se aplicaron pruebas de rangos y comparaciones múltiples (Tukey) con la finalidad de conocer entre qué sistema se presentan diferencias y similitudes.

El procedimiento estadístico de los datos se llevó a cabo utilizando con el software SPSS versión 22 de prueba para Windows y se empleó el 95 % de confiabilidad (alfa 0,05).

Resultados y Discusión

Hierro

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es menor a 0,05 (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de hierro.

Fuentes de variabilidad	Suma de cuadrados	gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos	477,428	2	238,714	6,451	0,008
Dentro de grupos	629,040	17	37,002		
Total	1106,468	19			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de cacao presenta un valor de 24,54 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de bosque (14,28 mg/kg de suelo) y maíz (14,87 mg/kg de suelo), los cuales no muestran diferencias significativas entre sí. El contenido de hierro en el suelo del cultivo de cacao se puede atribuir a la acumulación de hojarasca y la descomposición de residuos orgánicos (Figura 2).



Fig. 2: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de hierro en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de hierro en el suelo para un $p\text{-valor} \leq 0,05$ (Tukey).

Arévalo-Gardini et al. (2016), expresa que la presencia de hierro en los suelos del sistema de cacao está influenciada por características físico-químicas como la textura, el contenido de arcilla y la materia orgánica, que incrementa la capacidad del suelo para retener este metal, esta acumulación puede mejorar la disponibilidad de hierro al aumentar la actividad microbiana y la liberación de nutrientes durante la descomposición de residuos orgánicos. Por otro lado, Briceño et al. (2020), destacan que el pH del suelo es un factor crucial en la movilidad y disponibilidad del hierro, ya que un pH bajo lo hace más accesible, mientras que un pH alto favorece su precipitación en formas

menos solubles. Estas condiciones indicarían que sistemas con menor manejo químico, como el bosque, podrían mantener niveles más altos de hierro debido a la conservación de su estructura natural.

No obstante, los resultados del presente estudio reflejan que los suelos cultivados con cacao presentan niveles significativamente mayores de hierro (24,54 mg/kg) en comparación con el bosque (14,28 mg/kg) y el maíz (14,87 mg/kg). Esto evidencia que las prácticas de manejo en el cacao, como la fertilización y el aporte constante de materia orgánica por la hojarasca, contribuyen a modificar las propiedades del suelo, aumentando su capacidad de retener hierro. Por otro lado, el cultivo de maíz, a pesar de estar bajo manejo agrícola, muestra niveles de hierro similares a los del bosque. Esto podría deberse a prácticas de manejo menos intensivas o a que el maíz no modifica significativamente las propiedades del suelo relacionadas con la disponibilidad de hierro, como el pH o la capacidad de intercambio catiónico, en comparación con el cacao.

Manganeso

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es menor a 0,05 (Tabla 3).

Tabla 3: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de manganeso.

Fuentes de variabilidad	de Suma de cuadrados	de gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos	6,783	2	3,392	3,822	0,043
Dentro de grupos	15,085	17	0,887		
Total	21,868	19			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de cacao presenta un valor de 4,28 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de bosque (3,35 mg/kg de suelo) y maíz (2,94 mg/kg de suelo), los cuales muestran diferencias significativas entre sí. El mayor contenido de Mn se debe a factores como la acumulación de materia orgánica y el manejo agronómico de los sistemas, favoreciendo la disponibilidad de micronutrientes en el suelo (Figura 3).

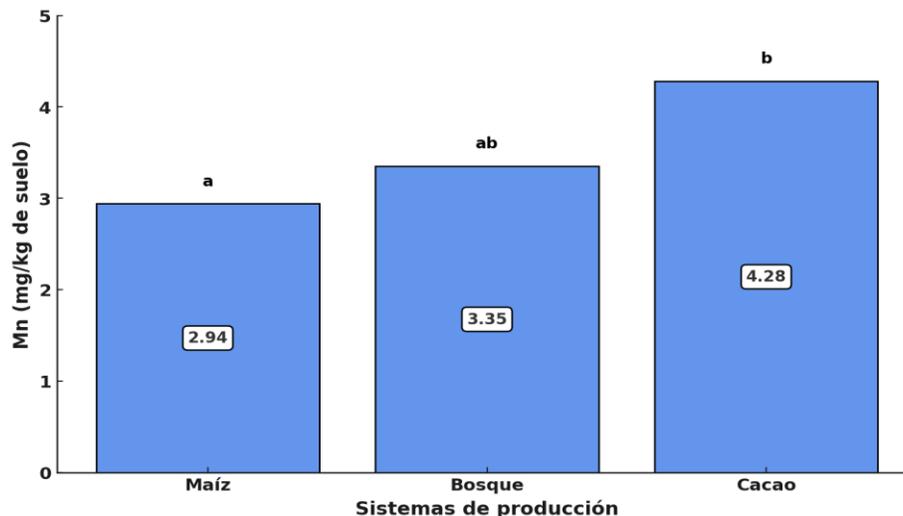


Fig. 3: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de manganeso en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de manganeso en el suelo.

Según Francisco-Santiago et al. (2023), la mayor disponibilidad de Mn en los suelos cacaoteros está asociada con factores como la acumulación de materia orgánica y las dinámicas químicas derivadas del manejo agronómico en los sistemas productivos. Este estudio señala que, en los suelos dedicados al cultivo de cacao, la hojarasca de los árboles de sombra y la actividad microbiana contribuyen significativamente a la liberación de nutrientes como el manganeso.

Sin embargo, los resultados observados en el gráfico no se ajustan completamente a esta afirmación, ya que el agroecosistema bosque, a pesar de su alta acumulación de materia orgánica y la ausencia de intervenciones químicas significativas, presenta niveles de Mn más bajos (3,35 mg/kg) en comparación con el cacao (4,28 mg/kg). Esto podría atribuirse a que las dinámicas de reciclaje de nutrientes en el bosque son menos intensas debido a la menor actividad biológica específica para la mineralización del manganeso.

Cobre (Cu)

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es menor a 0,05 (Tabla 4).

Tabla 4: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de cobre.

Fuentes de variabilidad	de	Suma de cuadrados	de gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos		8,275	2	4,138	20,854	0,000
Dentro de grupos		3,373	17	0,198		
Total		11,648	19			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de cacao presenta un valor de 2,92 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de bosque (1,58 mg/kg de suelo) y maíz (1,63 mg/kg de suelo), los cuales no muestran diferencias significativas entre sí. La presencia de cobre en el sistema de cacao puede estar relacionado con las prácticas agrícolas del cultivo de cacao, como el uso de fertilizantes y fungicidas que contienen cobre, que podrían incrementar su acumulación en el suelo (Figura 4).

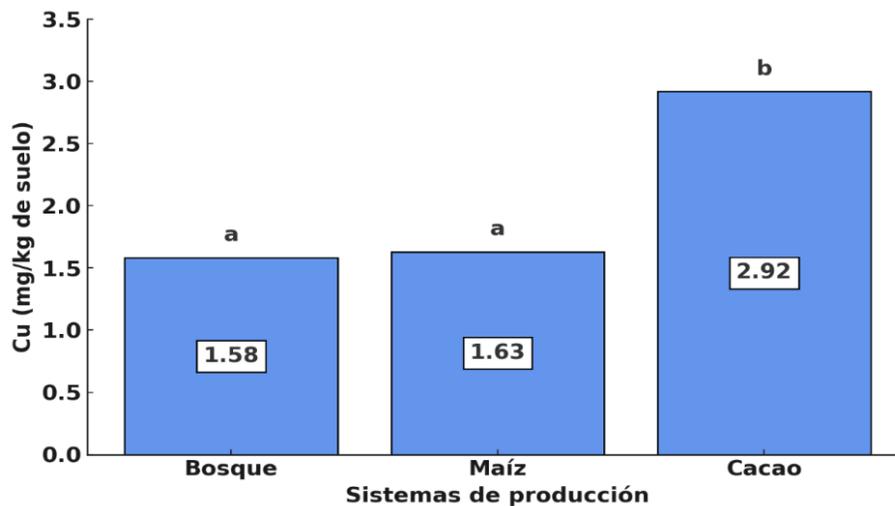


Fig. 4: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de cobre en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de cobre en el suelo.

Los resultados observados en el contenido de cobre en el suelo podrían explicarse por las diferencias en el manejo agronómico y las características específicas de cada sistema de producción. Estudios previos Según Arévalo-Gardini et al. (2016), señalaron que la presencia de cobre en los suelos agrícolas intensivos como el cacao está influenciada por prácticas agrícolas,

factores edáficos como el pH y el contenido de materia orgánica, y por el uso de insumos químicos, fungicidas a base de cobre. En el gráfico, se observa que el contenido de cobre es significativamente mayor en el agroecosistema de cacao (2,92 mg/kg de suelo) en comparación con el bosque (1,58 mg/kg) y el maíz (1,63 mg/kg), lo cual evidencia una mayor acumulación de este metal en sistemas productivos intensivos.

Esta diferencia es consistente con la idea de que los agroecosistemas intensivamente manejados, como el del cacao, tienden a recibir mayores aportes de insumos químicos, lo que podría explicar la acumulación de cobre en estos suelos. Sin embargo, los valores registrados en el bosque, a pesar de no recibir intervenciones químicas, sugieren que factores intrínsecos del suelo, como su composición mineral y capacidad de retención de nutrientes, también influyen en los niveles de cobre.

Zinc

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es mayor a 0,05 (Tabla 5).

Tabla 5: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de zinc.

Fuentes de variabilidad	Suma de cuadrados	de gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos	0,131	2	0,065	1,756	0,203
Dentro de grupos	0,632	17	0,037		
Total	0,762	19			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de bosque presenta un valor de 1,59 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de maíz (1,39 mg/kg de suelo) y cacao (1,53 mg/kg de suelo), los cuales muestran diferencias significativas entre sí. El contenido de Zn en el cultivo bosque está relacionado con la menor perturbación del suelo y la mayor cantidad de materia orgánica en este sistema. La descomposición de la hojarasca y la mínima extracción de nutrientes contribuye a mantener niveles altos de micronutrientes como el Zinc (Figura 6).

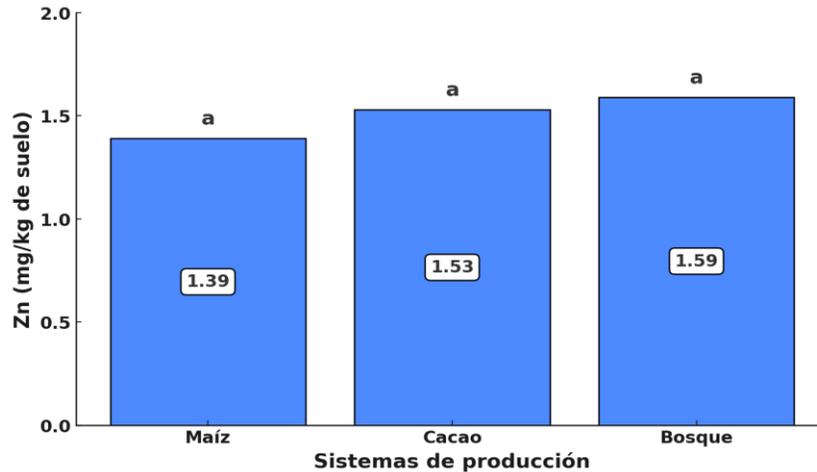


Fig. 5: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de zinc en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de zinc en el suelo.

Según Barrera León et al. (2020), los suelos en sistemas de bosque tienen mayores niveles de zinc debido a la constante incorporación de materia orgánica, que actúa como fuente de nutrientes esenciales. Esto coincide con el gráfico, donde el bosque presenta el mayor contenido de zinc (1,59 mg/kg). Los suelos bajo bosques son menos perturbados por actividades humanas, lo que permite una mayor retención de zinc, facilitada por la interacción entre materia orgánica y propiedades químicas como el pH ácido típico de estos ecosistemas.

Por otro lado, Huamaní-Yupanqui et al. (2012), destacan que el zinc es un micronutriente esencial presente de forma natural en la corteza terrestre, cuya disponibilidad es regulada por las propiedades del suelo, como el pH. En suelos con características ácidas, como los identificados en bosques, el zinc se vuelve más soluble y accesible para las plantas, lo que favorece su acumulación. Este fenómeno se observa claramente en el gráfico presentado, donde el sistema de bosque muestra el mayor contenido de zinc (1,59 mg/kg) en comparación con los sistemas agrícolas de cacao (1,53 mg/kg) y maíz (1,39 mg/kg).

Boro

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es menor a 0,05 (Tabla 6).

Tabla 6: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de boro.

Fuentes de variabilidad	de	Suma de cuadrados	de gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos		40,272	2	20,136	31,898	0,000
Dentro de grupos		10,732	17	0,631		
Total		51,004	19			

Fuente: Elaboración propia

El sistema de bosque presenta un valor de 3,89 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de cacao (0,55 mg/kg de suelo) y maíz (1,29 mg/kg de suelo), los cuales muestran diferencias significativas entre sí. Los altos niveles de boro en suelos de bosque podrían deberse a la menor intervención antrópica y a la acumulación orgánica natural (Figura 6).

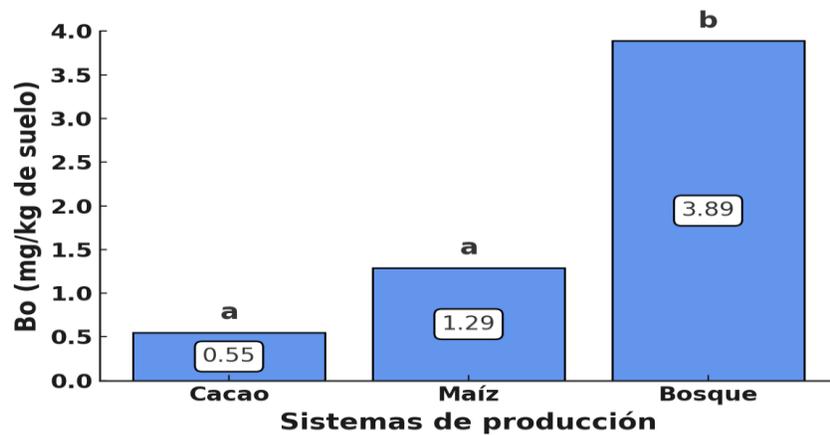


Fig. 6: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de boro en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de boro en el suelo.

La mayor acumulación de Bo en el sistema de Bosque se atribuye a la presencia de materia orgánica y menor intervención antrópica, factores que favorecen la retención de micronutrientes como lo señala Rojas-Solano et al. (2021). Además, los suelos bajo cobertura vegetal natural suelen presentar una mayor capacidad para mantener el equilibrio de nutrientes esenciales. El contenido de boro (Bo) en el suelo varía significativamente según el sistema de producción, como lo demuestra el análisis estadístico. En el sistema de Bosque, la concentración de Bo es

significativamente mayor (3,89 mg/kg) que en los sistemas de Cacao (0,55 mg/kg) y Maíz (1,29 mg/kg). Este hallazgo resalta el impacto del tipo de manejo y cobertura del suelo en la disponibilidad de micronutrientes esenciales.

Azufre

En la prueba estadística paramétrica realizada se evidencia la presencia de diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción objeto de estudio, ya que el p-valor obtenido es mayor a 0,05 (Tabla 7).

Tabla 7: Resultados del análisis de varianza de un factor intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas entre los sistemas de producción en función del contenido de azufre.

Fuentes de variabilidad	Suma de cuadrados	de gl	Cuadrados medios	F	p-valor
Entre grupos	174,711	2	87,356	1,399	0,274
Dentro de grupos	1061,411	17	436		
Total	1236,122	19			

El sistema de maíz presenta un valor de 21,67 mg/kg de suelo, significativamente mayor que los sistemas de bosque (14,84 mg/kg de suelo) y cacao (15,56 mg/kg de suelo), los cuales muestran diferencias significativas entre sí. El nivel más alto de azufre en los suelos está en el cultivo de maíz. Esto atribuye a prácticas de manejo agrícola que incrementen los niveles de azufre en el suelo, como la aplicación de fertilizantes que contienen este nutriente (Figura 7).

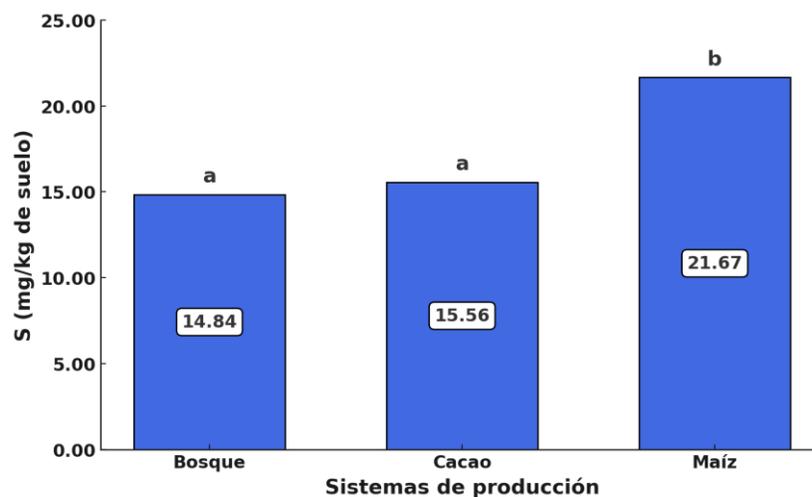


Fig. 7: Efecto de los sistemas de producción en el contenido de azufre en el suelo.

*Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre sistemas de producción en relación con el contenido de azufre en el suelo.

Según Martínez-Aguilar et al. (2020), la mayor presencia de azufre (S) en el cultivo de maíz se debe al uso de fertilizantes como el nitrato de amonio y el sulfato de amonio, que aportan azufre como componente secundario. Estos fertilizantes son aplicados en mayores cantidades en el maíz debido a su alta demanda nutricional, lo que incrementa significativamente los niveles de azufre en el suelo. Llanga et al. (2023), destacan que el uso de labranza convencional en el maíz también contribuye a esta mayor concentración de azufre. Este tipo de labranza remueve y airea el suelo, acelerando la descomposición de la materia orgánica a través de un proceso llamado mineralización.

Por otro lado, en los sistemas de cacao y bosque, la cantidad de azufre en el suelo es menor porque estos sistemas dependen casi exclusivamente de los ciclos naturales de reciclaje de materia orgánica. En el caso del bosque, la ausencia de fertilización química y la lenta descomposición de los residuos orgánicos limitan la liberación de azufre. En los cacaotales, aunque hay aportes orgánicos, el manejo menos intensivo y la menor aplicación de fertilizantes reducen la acumulación de este nutriente.

Conclusiones

El análisis demuestra que la composición y disponibilidad de micronutrientes en los suelos están profundamente influenciadas por el tipo de manejo agronómico y las características específicas de cada sistema de uso del suelo. En sistemas agrícolas, como el cacao y el maíz, el manejo, incluyendo fertilizantes y la acumulación de materia orgánica, generan variaciones significativas en la concentración de nutrientes como hierro, manganeso, cobre y azufre.

El hierro en los suelos está condicionado por factores fisicoquímicos como la textura, el pH y el contenido de materia orgánica. Los suelos cultivados con cacao presentan niveles más altos de hierro debido a prácticas de manejo como la fertilización y el aporte de materia orgánica. En contraste, los suelos de bosque y maíz tienen niveles similares, reflejando un menor impacto de manejo intensivo sobre la disponibilidad de este micronutriente.

La disponibilidad de manganeso está influenciada por la materia orgánica y el manejo agronómico. Aunque el bosque acumula más materia orgánica, los suelos de cacao presentan mayores niveles

de manganeso, posiblemente debido a una actividad microbiana más intensa que favorece la liberación de este nutriente.

El contenido de cobre en los suelos es mayor en sistemas agrícolas intensivos como el cacao debido al uso de insumos químicos, en particular fungicidas. En contraste, los suelos de bosque y maíz presentan niveles menores, indicando que las prácticas agrícolas menos intensivas o la ausencia de ellas reducen la acumulación de cobre.

El zinc es más abundante en los suelos de bosque, gracias a la constante incorporación de materia orgánica y un pH ácido favorable. Los suelos agrícolas, como los de cacao y maíz, tienen menores niveles debido a la lixiviación y a una menor prioridad del zinc en los programas de fertilización.

El mayor contenido de boro está en los suelos de bosque por el reciclaje natural de materia orgánica y la falta de prácticas agrícolas que modifiquen su disponibilidad. En los sistemas de maíz y cacao, la intervención humana y el manejo específico de nutrientes resultan en niveles más bajos de este elemento.

Los suelos cultivados con maíz presentan los mayores niveles de azufre debido al uso de fertilizantes químicos y labranza intensiva, que aceleran la mineralización de materia orgánica. En comparación, los sistemas de cacao y bosque dependen de procesos naturales de reciclaje, resultando en menores niveles de azufre.

Finalmente, se observa que los sistemas agrícolas, aunque incrementan la disponibilidad de ciertos nutrientes, tienden a alterar las dinámicas naturales del suelo, lo que podría tener implicaciones en la sostenibilidad a largo plazo.

Referencias

1. Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
2. Baca, I; Azcón, B. E; Baldani, R, Bonilla, V. L. D; & Ruth. (2010). Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos Corpoica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11, 155–164.
3. Barahona-Amores, L. A., Villarreal-Núñez, J. E., González-Carrasco, W., & Quiro-McIntire, E. I. (2019). Absorption of nutrients in rice in an inceptisol soil under irrigation

- in Coclé, Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 407–424.
<https://doi.org/10.15517/am.v30i2.33997>
4. Barrera León, J., Barrezueta Unda, S., & García Batista, R. M. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 182–190.
<https://doi.org/10.62452/jvp57q36>
 5. Barrezueta-Unda, S. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *Ciencia UAT*, 14(1), 155.
<https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>
 6. Briceño, J., Armado, A., Sequera, Á., & Niño-Ruiz, Z. (2020). Estimation of base and reference levels for iron, manganese, nickel and zinc in soils of an area not intervened anthropogenically. *Revista de Investigación Talentos*, 7(1), 1–11.
 7. Chavarría, M. H., & Estrada-León, R. J. (2023). Farmers of the southern Caribbean of Costa Rica: Socioeconomic, productive, and commercial characterization. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3). <https://doi.org/10.15517/am.2023.53198>
 8. Francisco-Santiago, S. P., Palma-López, D. J., Sánchez-Hernández, R., Obrador-Olán, J. J., & García-Alamilla, P. (2023). Fertilidad edáfica y nutrición en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres suelos de Tabasco, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1116>
 9. Huamaní-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao [*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4), 339–344.
<https://www.redalyc.org/pdf/1699/169926831006.pdf>
 10. Livia, C., Sánchez, G., & Cruces, L. (2020). Diversidad de insectos del suelo asociados al cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Molina / Lima / Perú. *Ecología Aplicada*, 19(2), 57.
<https://doi.org/10.21704/rea.v19i2.1556>
 11. Llanga, L., Avila-salem, M. E., Montesdeoca, F., Aponte, H., Ron-garrido, L., Espinosa, J., Rivera, M., Borie, F., Cornejo, P., & Ochoa, S. A. (2023). Efecto de la labranza y fertilización nitrogenada en los cultivos de fréjol y maíz sobre indicadores biológicos de la calidad de un suelo andino del Ecuador. *Siembra*, 10(1), e4261.
<https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4261>

12. Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., Reyes-Sosa, M. B., & La O-Arias, M. A. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(4), 871–881. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>
13. Montatixe Sánchez, C. I., & Eche Enríquez, M. D. (2021). Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Píllaro. *Siembra*, 8(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i1.1735>
14. Muñoz, L., Cedeño, G., Cedeño, G., & Avellan, B. (2022). Rendimiento, rentabilidad y eficiencia agronómica de nitrógeno en maíz de secano con fertilización foliar complementaria de Zn y Mo. *Manglar* (Vol. 19, Issue 3, pp. 239–246). <http://www.scielo.org.pe/pdf/mang/v19n3/2414-1046-mang-19-03-239.pdf>
15. Ramos M, A. (2017). Identificación de suelos del orden Inceptisol. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 8(2), 170–181. <https://revistalogos.policia.edu.co:8443/index.php/rlct/article/view/304>
16. Rodríguez, I., Pérez, H., & Carrillo, R. (2022). Impacto del tipo de cultivo en algunas propiedades físicas de un suelo Inceptisol en la granja Santa Inés. *Revista Científica Agroecosistemas* 10(2), 51-57. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/539/512>
17. Rodríguez, I., Pérez, H., & García, R. (2022). Comportamiento de algunas propiedades químicas de un suelo Inceptisol en los cultivos de maíz y cacao. *Revista Científica Agroecosistemas* 10(2), 44-50. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/538/511>
18. Rojas-Solano, J., Brenes-Gamboa, S., & Abarca-Monge, S. (2021). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *InterSedes*. <https://doi.org/10.15517/isucr.v23i47.47695>
19. Vera, L., Hernández, A., Mesías, F., Cedeño, A., Guzmán, Á., Ormaza, K., & López, G. (2019). Principales suelos y particularidades de su formación del sistema Carrizal-Chone, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 40(2), 1–35. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v40n2/1819-4087-ctr-40-02-e06.pdf>