



Relación entre características químicas del suelo y desarrollo vegetativo del cafeto en diferentes arreglos agroforestales

Relationship between soil chemical characteristics and vegetative development of coffee trees in different agroforestry arrangements

Relação entre características químicas do solo e desenvolvimento vegetativo do cafeeiro em diferentes arranjos agroflorestais

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.353>

Luis Tibhy Acosta Trinidad
luistibhy@hotmail.com

Nilson Arizapana Soto
narizapanas@undac.edu.pe

Andrea Davila Ordaya
adavilao@undac.edu.pe

Gerson Camilo Acosta Huaman
camilogwp@gmail.com

Carlos Antonio Victorio Piedra
2095403030@undac.edu.pe

Jafeth Benyamin Cespedes Ratto
2115403080@undac.edu.pe

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Oxapampa, Perú

Artículo recibido: 16 de abril 2025 / Arbitrado: 25 de marzo 2025 / Publicado: 1 de mayo 2025

RESUMEN

El desarrollo del cafeto (*Coffea arabica* L.) está estrechamente relacionado, entre otras características, con las condiciones químicas del suelo. Ante ello, el **objetivo** fue determinar la relación entre las características químicas del suelo y el desarrollo del cafeto bajo arreglos agroforestales en el distrito de Huancabamba, Oxapampa (Perú). La investigación tuvo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo comparativo-correlacional y transversal. Se emplearon los arreglos cafeto con pacaé y cafeto con pino; cada arreglo estuvo establecido en dos parcelas distintas. En cada arreglo se delimitó tres sub parcelas, en las que se colectó una muestra compuesta de suelo para la determinación de características químicas, se pesó la producción de café pergamino seco y se estimó parámetros de crecimiento del cafeto. La relación entre las características químicas del suelo y el desarrollo del cafeto fue determinada mediante la correlación de Pearson. Se observó una correlación significativa ($p \leq 0.05$), lo que comprobó la respuesta del vigor vegetativo e índice de vigor vegetativo del cafeto al magnesio y materia orgánica respectivamente. En general, se observa mejor condición edafoforestal para el crecimiento y desarrollo del cafeto en el arreglo cafeto con pacaé.

Palabras clave: Correlación de Pearson; Inga sp.; Magnesio; Materia orgánica; Vigor vegetativo

ABSTRACT

The development of the coffee plant (*Coffea arabica* L.) is closely related, among other characteristics, to the chemical conditions of the soil. Given this, the **objective** was to determine the relationship between the chemical characteristics of the soil and the development of coffee plants under agroforestry arrangements in the district of Huancabamba, Oxapampa (Perú). The research had a quantitative approach of a descriptive, comparative-correlational, and cross-sectional type. The arrangements used were coffee with pacaé and coffee with pine; each arrangement was established in two different plots. In each arrangement, three subplots were delimited, where a composite soil sample was collected to determine chemical characteristics, the production of dry parchment coffee was weighed, and coffee plant growth parameters were estimated. The relationship between soil chemical characteristics and coffee plant development was determined using Pearson's correlation. A significant correlation ($p \leq 0.05$) was observed, confirming the response of vegetative vigor and vegetative vigor index of the coffee plant to magnesium and organic matter, respectively. In general, better edaphoforest conditions for the growth and development of the coffee plant were observed in the coffee-pacaé arrangement.

Key words: Pearson correlation; Inga sp.; Magnesium; Organic matter; Vegetative vigor

RESUMO

O desenvolvimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) está intimamente relacionado, entre outras características, às condições químicas do solo. Diante disso, o **objetivo** foi determinar a relação entre as características químicas do solo e o desenvolvimento do cafeeiro sob arranjos agroflorestais no distrito de Huancabamba, Oxapampa (Perú). A pesquisa teve uma abordagem quantitativa de tipo descritivo, comparativo-correlacional e transversal. Os arranjos utilizados foram café com pacaé e café com pinheiro; cada arranjo foi estabelecido em duas parcelas distintas. Em cada arranjo, foram delimitadas três subparcelas, onde foi coletada uma amostra composta de solo para determinação das características químicas, foi pesada a produção de café pergamino seco e estimados parâmetros de crescimento do cafeeiro. A relação entre as características químicas do solo e o desenvolvimento do cafeeiro foi determinada por meio da correlação de Pearson. Observou-se uma correlação significativa ($p \leq 0.05$), confirmando a resposta do vigor vegetativo e do índice de vigor vegetativo do cafeeiro ao magnésio e à matéria orgânica, respectivamente. De modo geral, melhores condições edafoflorestais para o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro foram observadas no arranjo café-pacaé.

Palavras-chave: Correlação de Pearson; Inga sp.; Magnésio; Matéria orgânica; Vigor vegetativo

INTRODUCCIÓN

El sostenimiento del crecimiento y desarrollo de cafetos (*Coffea arabica* L.) está determinado principalmente por la fertilidad química del suelo (1), y su disminución afecta los rendimientos y la viabilidad económica del cultivo (2). En el distrito de Huancabamba, los arreglos agroforestales con cafetos suelen incluir especies como el pacaé (*Inga* sp.) y el pino (*Pinus* sp.). El desarrollo del café en arreglos agroforestales se da en sectores del distrito que presentan variabilidad edáfica, esta condición, influenciada por la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo, es un factor clave en el crecimiento y la productividad del café. En la fertilidad del suelo, especialmente la disponibilidad de cationes esenciales y la regulación de la acidez, influyen significativamente en la producción de café (3); y se deteriora por consecuencia del agotamiento de nutrientes debido a malas prácticas de manejo (4).

Algunos informes detallan que el nitrógeno en el suelo, es uno de los factores más importante en la producción de granos y el calcio es el tercer nutriente más requerido por el café (5,6). Además, las características físicas del suelo tienen efecto en la productividad del cultivo (7). La productividad del café se ve limitada por la acidez prolongada del suelo, bajos niveles de fósforo y deficiencias de calcio, magnesio y boro, siendo este último crucial para la floración y el cuajado de frutos (8). Massawe y Mrema (9) informan que, la variabilidad en la producción de

café se debe principalmente al agotamiento de nitrógeno y fósforo en el suelo, causado por la absorción constante de estos nutrientes por los cafetos. El análisis de cómo las variaciones en las características químicas del suelo en diferentes arreglos agroforestales afectan el desarrollo del café, proporcionará información clave y que no existe para este distrito; además que estas características pueden variar en relación a las especies vegetales incluidas en el arreglo.

En condiciones de arreglo agroforestal, el contenido de materia orgánica derivada de este, influye en la disponibilidad de cobre, zinc y manganeso, aumentando sus niveles en el suelo (10); en su entorno se regulan algunas plagas, se reducen las pérdidas de frutos, se presenta una óptima fertilidad del suelo y un mínimo uso de fungicidas (11). Asimismo, favorecen significativamente la acumulación de magnesio en el suelo y en la biomasa vegetal, en comparación del monocultivo (12); la inclusión arbórea mejora ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo (13), que en conjunto tienen efecto en la producción de cafetos. Por ello, este trabajo se realizó con el objetivo de determinar la relación entre las características químicas del suelo (CE, pH, MO, P, K, CIC total y cationes cambiables) y el desarrollo del café (producción de café pergamino seco, vigor vegetativo e índice de vigor vegetativo) en dos arreglos agroforestales para identificar el factor químico limitante en el suelo, en Huancabamba, Oxapampa, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se ejecutó en los sectores de Espiritupata y Chilachi, en el distrito de Huancabamba, provincia de Oxapampa (Perú). A nivel distrital, se presenta dos temporadas marcadas, lluviosa de octubre a marzo y seca de abril a setiembre, las condiciones climáticas generales son las consecutivas: temperatura media anual de 18.24 °C, humedad relativa de 84.91% y precipitación anual de 2730 mm (14). La colecta de muestras de suelo y estimación de parámetros de

crecimiento fue entre los meses de septiembre y octubre del 2024, en cuatro parcelas con arreglos agroforestales: arreglo cafeto (*Coffea arabica*) con pacaé (*Inga sp.*), en Espiritupata (437526.66 m E; 8849142.65 m N; 1693.51 msnm), arreglo cafeto (*C. arabica*) con pacaé (*Inga sp.*), en Chilachi (433282.62 m E; 8842999.79 m N; 1797.13 msnm), arreglo cafeto (*C. arabica*) con pino (*Pinus sp.*), en parcela A de Chilachi (433625.29 m E; 8842826.01 m N; 1823.57 msnm) y arreglo cafeto (*C. arabica*) con pino (*Pinus sp.*), en parcela B de Chilachi (433531.67 m E; 8842707.97 m N; 1823.57 msnm) Figura 1.

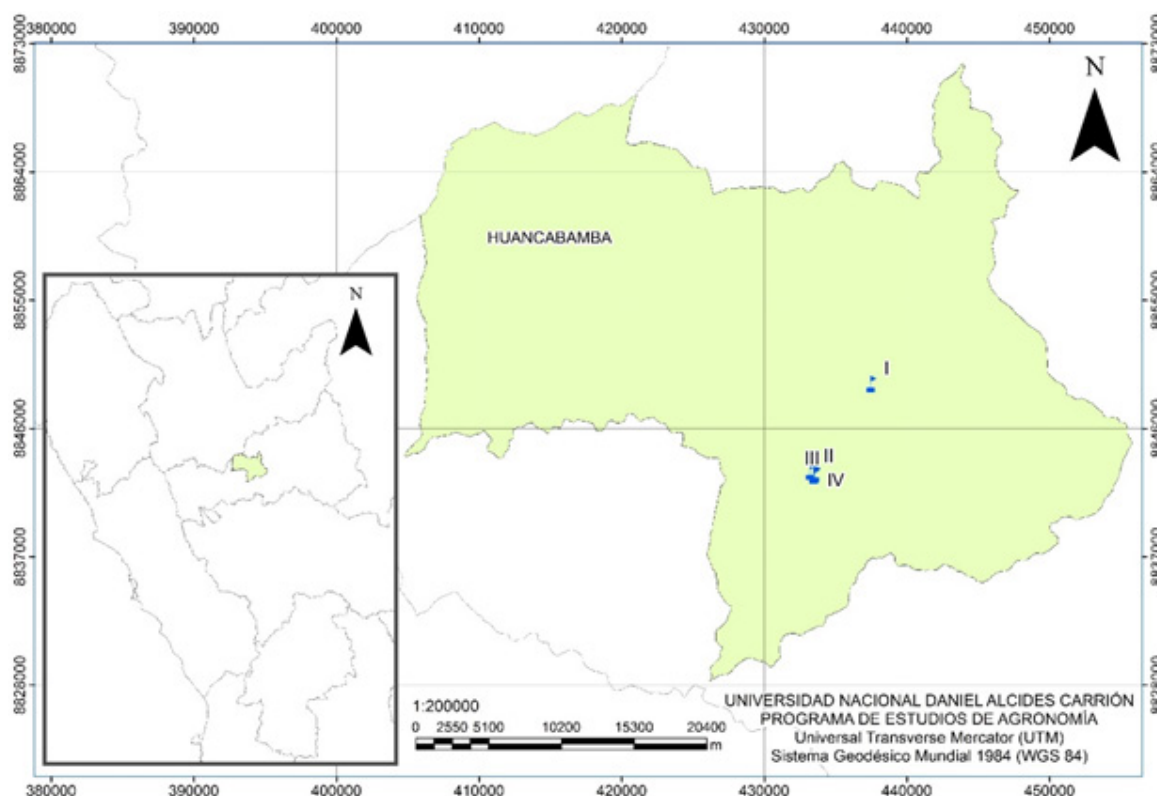


Figura 1. Ubicación de las parcelas agrícolas de estudio en el distrito de Huancabamba, Oxapampa, Perú.

Selección de arreglos agroforestales

Se seleccionaron dos arreglos agroforestales con café, distribuidos en cuatro parcelas agrícolas de 2400 m² cada una. El primer tipo corresponde al arreglo café de 6 años de edad (densidad de 1200 plantas) asociados con pacaes de 12.5 años de edad; estos se encuentran en las

localidades de Espiritupata, con una densidad de 42 pacaes, y en Chilachi, con una densidad de 24 pacaes. El segundo tipo incluye al arreglo café de 8 años de edad (densidad de 1200 plantas) asociados con pino de 16 años de edad (densidad de 96 pinos), establecidos en las parcelas A y B de Chilachi, respectivamente Figura 2.



Figura 2. Arreglos agroforestales en cuatro parcelas agrícolas de Huancabamba (octubre de 2024). I) Arreglo café con Pacae en Espiritupata. II) Arreglo café con Pacae en Chilachi. III) Arreglo café con Pino en parcela A de Chilachi. IV) Arreglo café con Pino en parcela B de Chilachi. Imágenes tomadas a 70 m de altura con un dron modelo DRDJI066.

Muestreo y análisis de suelo

Se recolectaron tres muestras compuestas de suelo, de 1 kg cada una, por parcela de arreglo agroforestal, hasta una profundidad de 0.2 m; un total de doce muestras rotuladas fueron trasladadas al Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional

Agraria La Molina, para su análisis químico. Los análisis realizados fueron la conductividad eléctrica (lectura de extracto de relación suelo-agua 1:1 y extracto de la pasta saturada), potencial de hidrogeniones (lectura de extracto de relación suelo-agua 1:1 y extracto de la pasta saturada), materia orgánica (Walkley & Black), fósforo (Olsen

modificado, NaHCO_3 0.5M, pH 8.5), potasio (extracto acetato de amonio 1N, pH 7), capacidad de intercambio catiónico total (acetato de amonio 1N, pH 7) y cationes cambiables (extracto amónico).

Estimación de parámetros de crecimiento y desarrollo de cafeto

En el almacén de granos de cada parcela agrícola estuvieron almacenados los sacos de café pergamino seco provenientes de tres sub parcelas (800 m²) del área de estudio (2400 m²); estos se pesaron utilizando una balanza electrónica de plataforma con una capacidad de 100 kg; los pesos registrados de cada saco fueron sumados para calcular la producción por sub parcela, el resultado se escaló a kg/ha. Se estimó la longitud de rama basal con un flexómetro desde la inserción al tallo principal hasta la base del brote, de dos ramas basales opuestas, la longitud del tallo principal con un flexómetro desde el cuello del tallo hasta la base del brote, el diámetro del tallo a una altura de 20 cm desde el cuello utilizando un vernier, vigor vegetativo (Ecuación 1) e índice de vigor vegetativo (Ecuación 2), en ocho cafetos seleccionados al azar por sub parcela.

$$VV = Li/L_{\text{promedio}} \text{ Ecuación 1}$$

Donde, VV es el vigor vegetativo, Li es la longitud de rama basal (cm) y L_{promedio} es la longitud promedio de ramas de cafetos evaluados (cm).

$$IVV = (H \times D)^{1/2} \text{ Ecuación 2}$$

Donde, IVV es el índice de vigor vegetativo; H es la longitud de tallo principal (cm); D es el diámetro de tallo (cm).

Análisis estadístico de los datos

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo comparativo-correlacional y transversal. Se utilizó estadística descriptiva para caracterizar las propiedades químicas del suelo en los arreglos agroforestales, con el fin de comprender su influencia en el desarrollo vegetativo del cafeto. Se aplicó la prueba t para identificar diferencias en la producción de café pergamino seco, longitud de rama basal, vigor vegetativo y en el índice de vigor vegetativo dentro de la condición edafoforestal de los arreglos agroforestales. Se realizó un análisis de componentes principales para comparar las condiciones edáficas en los arreglos agroforestales y explorar las relaciones entre las variables dentro del mismo conjunto de datos. Las asociaciones entre las características químicas del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto (producción de café pergamino seco, vigor vegetativo y en el índice de vigor vegetativo) se determinaron utilizando correlaciones de Pearson. Para los análisis estadísticos se consideró un nivel de significación del 5% ($p \leq 0.05$). Se utilizó el software Jamovi versión 2.3.28 para el análisis descriptivo, la prueba

t y de asociación. La representación de los gráficos del modelo ajustado se trabajó con Microsoft Excel versión 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características químicas del suelo

Se encontró que el arreglo café con paca en Espiritupata obtuvo los valores más altos de pH, fósforo (P), potasio (K en ppm), capacidad de intercambio catiónico total (CIC total) y en los niveles de magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K en meq/100g) como cationes intercambiables; pero el valor promedio más bajo para los cationes intercambiables de Al + H (condición favorable). En Chilachi, el arreglo de café asociado con paca presentó los valores más altos de conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y el catión intercambiable calcio (Ca), mientras que registró el valor promedio más bajo del catión intercambiable

Na. Por otro lado, en la parcela B de Chilachi, el arreglo de café con pino mostró la mayor concentración de cationes intercambiables de Al + H. En contraste, en la parcela A de Chilachi, el arreglo de café con pino obtuvo los valores más bajos de CE, pH, MO, K (ppm), CIC total, Ca, Mg y K (meq/100g) Tabla 1.

Para los arreglos agroforestales los niveles encontrados de CE indican que los suelos no son salinos, el pH va de muy fuertemente ácido (4.97) a fuertemente ácido (5.29), el contenido de MO en el perfil vertical de 0.2 m va de medio (3.16%) a alto (5.35%), el contenido de P es alto (> 14 ppm), el contenido de K va de medio (191 ppm) a alto (372 ppm) y el CIC total indicativo del máximo potencial de retención de nutrientes del suelo a largo plazo va de bajo (11.1) a medio (15); siendo condiciones sugeridas para el desarrollo de cafetos, aunque se propone el adicionamiento de enmienda calcárea.

Tabla 1. Características químicas del suelo en diferentes arreglos agroforestales del distrito de Huancabamba, 2024.

Características químicas del suelo	Cafeto con paca en Espiritupata	Cafeto con paca en Chilachi	Cafeto con pino en Chilachi parcela A	Cafeto con pino en Chilachi parcela B
	Media±E.E.	Media±E.E.	Media±E.E.	Media±E.E.
CE (dS/m)	0.141±5.77e-4	0.18±0.00577	0.101±5.77e-4	0.104±0.00306
pH	5.29±0.00667	5.21±0.0145	4.97±0.0557	5.03±0.00882
MO (%)	4.06±0.0982	5.35±0.108	3.16±0.162	4.8±0.02
P (ppm)	59±1.34	42.4±0.809	44.4±0.486	35.8±3.71
K (ppm)	372±18.2	218±14.1	191±8.89	199±22.3
CIC total	15±0.548	14.7±0.301	11.1±0.449	11.9±0.105
Ca (meq/100g)	6.52±0.227	7.87±0.496	2.94±0.0306	3.96±0.216
Mg (meq/100g)	1.27±0.153	0.943±0.107	0.723±0.0561	0.813±0.112
Na (meq/100g)	0.163±0.0233	0.147±0.0167	0.16±0.0173	0.153±0.0186
K (meq/100g)	0.247±0.0176	0.0833±0.00333	0.0533±0.00333	0.0867±0.00882
Al + H (meq/100g)	0.18±0.0153	0.233±0.0533	0.54±0.0208	0.543±0.0296

E.E.: error estándar de la media.

Crecimiento y desarrollo vegetativo del café

La producción de café pergamino seco e índice de vigor vegetativo (IVV) mostraron una respuesta altamente significativa ($p \leq 0.001$) a la condición edáfica del arreglo café con paca en Espiritupata Tabla 2, donde se muestra una diferencia de medias de 395.67 kg/ha y 17.57 unidades de IVV con respecto a la condición edáfica del arreglo café con paca en Chilachi; esto significó un incremento porcentual del

35.8% para la producción de café pergamino seco y 55.58% para el IVV. Por el contrario, el vigor vegetativo y longitud de rama basal no fueron afectados significativamente ($p > 0.05$) por alguna de las dos condiciones edáficas evaluadas. Los parámetros del desarrollo vegetativo del café no fueron afectados significativamente ($p > 0.05$) por la condición edáfica del arreglo café con pino, en parcelas de Chilachi Tabla 2; lo que puede deberse a la proximidad de la ubicación espacial de las parcelas y similar abonamiento.

Tabla 2. Efecto de las condiciones edáficas sobre el desarrollo vegetativo del café.

Desarrollo vegetativo	Condición edáfica			T estadístico	p
	Cafeto con paca en Espiritupata	Cafeto con paca en Chilachi			
Producción de café pergamino seco (kg/ha)	1105	709.33	395.67	65.24	<0.001
Vigor vegetativo (VV)	1.01	0.75	0.26	2.55	0.063
Longitud de rama basal (cm)	165.7	123.3	42.4	2.6	0.06
Índice de vigor vegetativo (IVV)	31.61	14.04	17.57	7.81	0.001
	Cafeto con pino en parcela A de Chilachi	Cafeto con pino en parcela B de Chilachi			
Producción de café pergamino seco (kg/ha)	707.67	702.33	5.34	0.94	0.401
Vigor vegetativo (VV)	0.73	0.71	0.02	1.095	0.335
Longitud de rama basal (cm)	120.2	116.8	3.4	1.04	0.358
Índice de vigor vegetativo (IVV)	14.54	25.72	11.18	-1.03	0.363

Condición edáfica sobre el desarrollo del café

El análisis de componentes principales (ACP) para las condiciones edáficas en los arreglos agroforestales, se sustentó en el resultado significativo de la prueba de esfericidad de

Bartlett ($X^2 = 167$; $p < 0.001$), indicativo de que las condiciones edáficas están correlacionadas entre sí. Las dos primeras dimensiones del análisis de componentes principales de las características químicas del suelo explicaron el 81.2% de la variabilidad total. La dimensión 1 explicó el 60.2%,

separando el arreglo agroforestal CPAESP y CPACHI que presentaron los niveles más altos de pH y capacidad de intercambio catiónico total, de los arreglos CPICHI-A y CPICHI-B que presentaron mayores niveles de Al + H. La dimensión 2 explicó el 21% y separó los arreglos agroforestales que presentaron mayor fósforo de aquellos con mayor contenido de materia orgánica.

En general, en el plano ortonormal se encontró agrupamiento de los arreglos agroforestales CPICHI-A y CPICHI-B por presentar altos contenidos de Al + H con ciertos contenidos de sodio. Por la distribución espacial de los arreglos, se presentó diferencias en la fertilidad de suelo separando los arreglos CPAESP y CPACHI Figura 3.

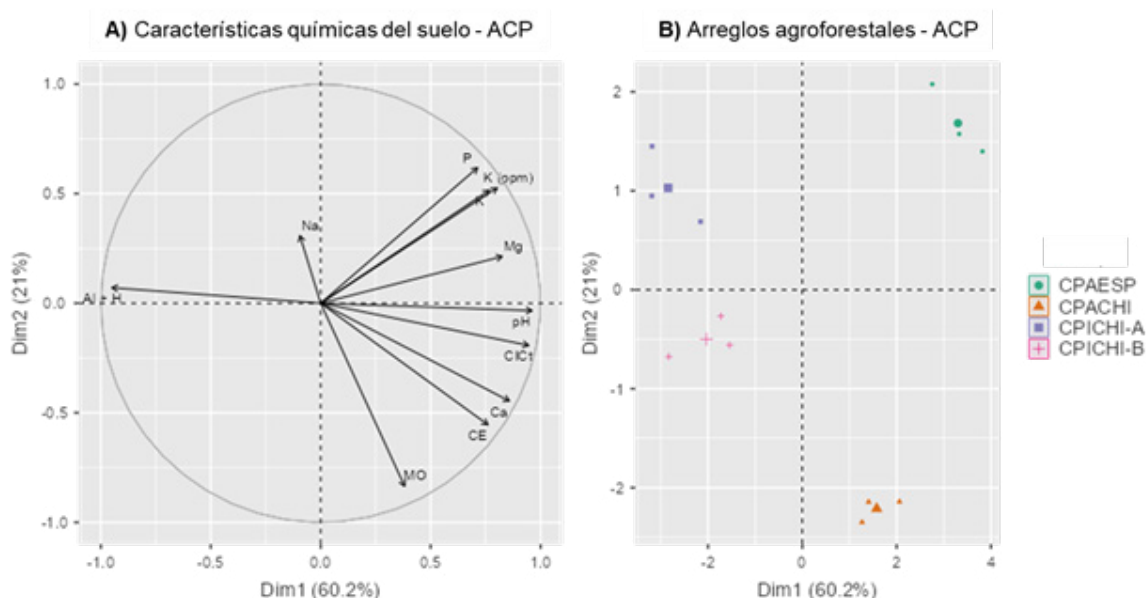


Figura 3. Biplot del análisis de componentes principales (ACP) de las características químicas del suelo y distribución de los arreglos agroforestales. CPAESP: café con paca en Espiritupata. CPACHI: café con paca en Chilichi. CPICHI-A: café con pino en parcela A de Chilichi. CPICHI-B: café con pino en parcela B de Chilichi.

La asociación entre las características químicas del suelo y el desarrollo vegetativo del café son fundamentales para comprender su crecimiento y productividad. En este sentido, en la parcela del arreglo café con paca en Espiritupata, se encontró que el magnesio (Mg) como catión intercambiable y el vigor vegetativo (VV), están correlacionados Figura 4. Con un coeficiente de

determinación del 100%, el VV es explicado por el Mg como catión intercambiable en un 100% Tabla 3. Al analizar el Mg, en las relaciones catiónicas de calcio-magnesio (Ca: Mg) y magnesio-potasio (Mg: K) con valores de 5.13 y 5.14 respectivamente Tabla 1, el valor de la relación Ca: Mg es normal y para la relación Mg: K se observa un mayor nivel de Mg en comparación con K (meq/100g) en el suelo,

lo que contribuyó positivamente en la nutrición del cafeto y en el crecimiento plagiotrópico de sus ramas basales. Asimismo, sin relación con otra característica química.

En la parcela B del arreglo cafeto con pino en Chilachi, se encontró que la materia orgánica (MO) y el índice de vigor vegetativo (IVV) del cafeto, están correlacionados Figura 5. Con un coeficiente de determinación del 100%, el IVV es explicado por la MO en un 100% Tabla 3. Sin embargo, en

esta unidad agrícola no se encontró correlación entre otra característica química del suelo con el IVV. En la parcela A del arreglo de cafeto con pino y parcela de cafeto con paca en Chilachi, se observaron valores heterogéneos de correlación y de determinación entre las características químicas del suelo, el vigor vegetativo, el índice de vigor vegetativo y la producción de café pergamino seco; y fueron estadísticamente no significativos ($p > 0.05$); Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de los índices de correlación (r) y del coeficiente de determinación [R^2] entre las características químicas del suelo y el desarrollo vegetativo del cafeto en los arreglos agroforestales de cafeto con paca y cafeto con pino.

Y: desarrollo vegetativo del cafeto x: característica química del suelo	Cafeto con paca en Espiritupata			Cafeto con paca en Chilachi			Cafeto con pino en Chilachi parcela A			Cafeto con pino en Chilachi parcela B		
	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)
CE (dS/m)	(-0.929) [86.4]	(-0.799) [63.8]	(-0.5) [25]	(-0.189) [3.57]	(-0.447) [20]	(-0.993) [98.7]	(-3.54e-14) [1.25e-25]	(0.667) [44.5]	(0.7) [48.9]	(0.5) [25]	(0.985) [97]	(0.941) [88.5]
pH	(-0.369) [13.6]	(-0.601) [36.2]	(-0.866) [75]	(-0.826) [68.2]	(-0.985) [97]	(0.5) [25]	(-0.988) [97.6]	(-0.632) [39.9]	(-0.597) [35.6]	(-0.619) [38.3]	(0.205) [4.21]	(0.034) [0.115]
MO (%)	(-0.941) [88.6]	(-0.819) [67.1]	(-0.529) [28]	(-0.987) [97.4]	(0.684) [46.8]	(-0.236) [5.59]	(-0.751) [56.5]	(-0.12) [1.43]	(-0.075) [0.57]	(0.655) [42.9]	(1*) [100]	(0.988) [97.6]
P (ppm)	(-0.881) [77.5]	(-0.724) [52.4]	(-0.396) [15.7]	(0.749) [56.1]	(-0.191) [3.65]	(0.717) [51.4]	(0.127) [1.61]	(-0.567) [32.2]	(-0.603) [36.4]	(0.947) [89.7]	(0.362) [13.1]	(0.517) [26.7]
K (ppm)	(0.136) [1.85]	(-0.13) [1.7]	(-0.508) [25.8]	(-0.35) [12.3]	(-0.292) [8.53]	(-0.96) [92.2]	(-0.987) [97.4]	(-0.628) [39.5]	(-0.593) [35.2]	(0.62) [38.4]	(-0.204) [4.15]	(-0.032) [0.105]
CIC total	(-0.309) [9.54]	(-0.047) [0.217]	(0.348) [12.1]	(0.851) [72.4]	(-0.995) [99]	(-0.459) [21.1]	(-0.943) [88.8]	(-0.925) [85.6]	(-0.907) [82.3]	(0.167) [2.78]	(-0.649) [42.1]	(-0.509) [25.9]
Ca (meq/100g)	(0.345) [11.9]	(0.581) [33.7]	(0.853) [72.8]	(0.425) [18]	(-0.888) [78.8]	(-0.871) [75.9]	(-0.982) [96.4]	(-0.857) [73.5]	(-0.834) [69.5]	(0.848) [71.9]	(0.951) [90.4]	(0.99) [98]
Mg (meq/100g)	(-1**) [100]	(-0.968) [93.7]	(-0.792) [62.8]	(-0.994) [98.7]	(0.72) [51.9]	(-0.187) [3.48]	(-0.951) [90.5]	(-0.502) [25.2]	(-0.464) [21.5]	(0.992) [98.5]	(0.732) [53.6]	(0.838) [70.2]

Y: desarrollo vegetativo del cafeto x: característica química del suelo	Cafeto con paca en Espiritupata			Cafeto con paca en Chilachi			Cafeto con pino en Chilachi parcela A			Cafeto con pino en Chilachi parcela B		
	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)	VV	IVV	PCPS (kg/ha)
Na (meq/100g)	(0.973) [94.6]	(0.877) [76.9]	(0.619) [38.3]	(-0.655) [42.9]	(0.06) [0.355]	(-0.803) [64.5]	(0.866) [75]	(0.311) [9.7]	(0.269) [7.24]	(-0.941) [88.5]	(-0.344) [11.8]	(-0.5) [25]
K (meq/100g)	(0.653) [42.6]	(0.83) [68.9]	(0.982) [96.4]	(0.982) [96.4]	(-0.894) [80]	(-0.115) [1.32]	(0.5) [25]	(-0.205) [4.22]	(-0.249) [6.18]	(-0.619) [38.3]	(0.205) [4.21]	(0.034) [0.115]
Al + H (meq/100g)	(0.944) [89.1]	(-0.558) [31.1]	(0.945) [89.3]	(0.982) [96.4]	(-0.894) [80]	(-0.115) [1.32]	(-0.721) [51.9]	(-0.074) [0.548]	(-0.03) [8.91e-2]	(-0.994) [98.9]	(-0.72) [51.8]	(-0.828) [68.6]

* y **/Significancia estadística al 5% y 1% de probabilidad. VV: vigor vegetativo. IVV: índice de vigor vegetativo. PCPS: producción de café pergamino seco.

El contenido de magnesio (Mg) tiene un efecto no lineal sobre el vigor vegetativo (VV) del café Figura 4; inicialmente, un aumento en los niveles de Mg aumenta el VV, alcanzando un máximo (1.4426) cuando el Mg se aproxima a

1.3665 meq/100g de suelo; a partir de este punto, un mayor contenido de Mg está asociado con una reducción del VV; lo que sugiere la existencia de un nivel óptimo para el Mg en el arreglo café con paca en Espiritupata

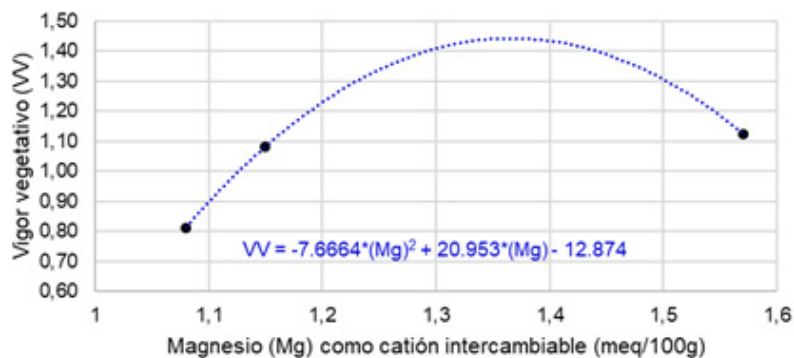


Figura 4. Relación de regresión entre el magnesio (Mg) como catión intercambiable (x) y vigor vegetativo del café (y).

La materia orgánica (MO) del suelo tiene un efecto directamente proporcional sobre el índice de vigor vegetativo (IVV) del café Figura 5; la MO está asociada a un coeficiente positivo que indica una línea de regresión ascendente para el IVV: donde, cada unidad porcentual de aumento en la MO se relaciona con un incremento de

544.78 unidades en el IVV. El intercepto (-2589.3) representa un IVV cuando no se tiene MO en el suelo. La ecuación plantea que, para valores menores e igual a 4.75292% de MO, el IVV no es influenciado y que este valor podría interpretarse como un indicador de deficiencia nutrimental en los cafetos.

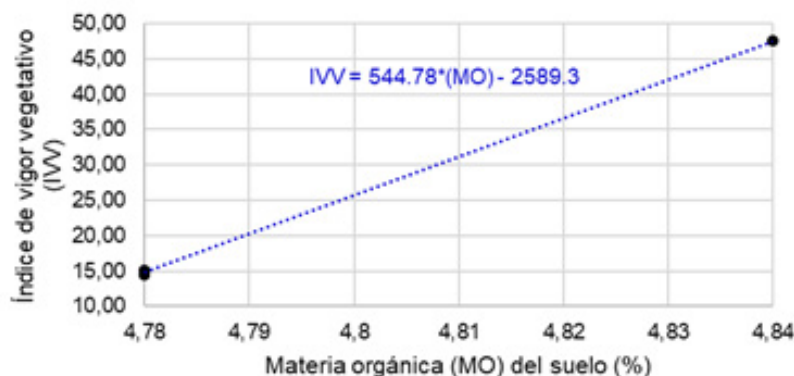


Figura 5. Relación de regresión entre la materia orgánica (x) e índice de vigor vegetativo del café (y) asociado con pino, en la parcela B de Chilachi

Discusión

Los valores mayores de pH, P, K, CIC total, Mg y Na ocurrieron en el arreglo agroforestal café con paca en Espiritupata. Los altos niveles en características particulares a cada arreglo agroforestal posiblemente se debieron a la edafogénesis y al nivel altitudinal, este último, concuerda con lo descrito por Martunis *et al.* (15) quienes observaron una tendencia inversamente proporcional del P al incremento de la altitud. Incluso, un mejor pH del suelo con arreglos agroforestales que en condiciones de bosque (16).

Valores más altos de CE, MO, Ca y Al + H se proyectaron en el arreglo agroforestal café con paca en Chilachi. En este sentido, Gutierrez y Lévano (17), encontraron mejores condiciones de MO y pH en el suelo, que contribuyen a mejores respuestas de los cultivos de interés económica bajo este arreglo. Villacis *et al.* (18) consideran que la concentración de nutrientes en el suelo depende de múltiples factores, entre ellos la fertilidad del suelo, las condiciones fisiológicas de las plantas y la composición de especies presentes en el agroecosistema. En efecto, Alvarado *et al.* (19) reportaron que las condiciones del suelo favorecen la nutrición, la aireación y el drenaje, lo que puede contribuir a una producción eficiente y saludable del café.

La producción de café pergamino seco e índice de vigor vegetativo en el arreglo agroforestal café con paca en Espiritupata presentaron valores

más altos con respecto al arreglo agroforestal café con paca en Chilachi; lo que pudo deberse a la respuesta del genotipo de café, expuesto a un suelo enriquecido por la inserción arbórea (20). Ante ello, Morales *et al.* (21) sugieren que la cobertura forestal es fundamental para el desarrollo vegetativo y reproductivo de cafetos. En particular, el componente forestal captura los nutrientes lixiviados en las capas más profundas del suelo, mejorando así la eficiencia en su uso (22); optimiza la dinámica microbiana del suelo, lo que contribuye de manera positiva a su salud (23).

Los arreglos agroforestales, contribuyen a la recuperación, al mantenimiento y en la mejora de la fertilidad del suelo (24,25). Conjuntamente, el componente forestal favorece el equilibrio de los nutrientes en el suelo a través de diversos procesos, como la incorporación de hojarasca, la descomposición de materia orgánica, la liberación y fijación de nutrientes, la fijación biológica del nitrógeno atmosférico y el transporte de nutrientes desde capas profundas a cercanas al sistema radical (26).

El magnesio (Mg) se relacionó de forma no lineal con el vigor vegetativo (VV) en el arreglo agroforestal café con paca en Espiritupata, especificando que con 1.3665 meq de Mg por 100 g de suelo se obtiene el máximo VV. Esta relación es positiva hasta un punto máximo en condiciones relativamente bajas de potasio (K) y aluminio (Al), pero cuando el K presenta niveles altos, la relación

se vuelve inversamente proporcional debido a la menor absorción de Mg, evidenciándose en las hojas de ramas basales, que fueron utilizadas para estimar el VV. Sustentado en el antagonismo iónico entre Mg y K, que es reflejado a nivel foliar (27,28). Es así que, el Mg y el K ejercen efectos sinérgicos en la fotosíntesis, el transporte y asignación de carbohidratos, el metabolismo del nitrógeno y el equilibrio osmótico celular (29).

En suelos de unidades agrícolas con una deficiencia extrema de Mg, un alto contenido de potasio podría agravar esta carencia (30). El Mg es relativamente abundante en la mayoría de los ecosistemas y rara vez limita el crecimiento vegetal (31). Su suministro óptimo, mejora los componentes del rendimiento del producto cosechado (32); no obstante, la competencia en el suelo con otros cationes (K^+ y NH_4^+) puede generar una deficiencia de Mg en los cafetos (28). El Mg es un macroelemento clave en el agroecosistema del cafeto, y su concentración en las hojas dependerá de su disponibilidad en la solución del suelo y en el complejo de intercambio catiónico (33). Sin embargo, la absorción de Mg por parte del cafeto se ve afectada negativamente por una alta relación Ca: Mg (mayor proporción de Ca), así como por un pH bajo (mayor concentración de Al) en los suelos (34); y su deficiencia en la planta afecta potencialmente su crecimiento a través de reducciones severas en la fotosíntesis (35).

La materia orgánica (MO) estuvo asociada linealmente con el índice de vigor vegetativo (IVV) en el arreglo agroforestal cafeto con pino en una parcela de Chilachi; lo que sugiere, que la MO fue una fuente importante de macro y micronutrientes en el suelo, desde donde las plantas los absorbieron para favorecer su crecimiento (36,37). Sustentado en que los arreglos agroforestales conservan los niveles iniciales de MO y los incrementan a medida que el arreglo se desarrolla con los años (38), lo que concuerda con el periodo del arreglo agroforestal estudiado.

El estado de crecimiento encontrado en términos de IVV, posiblemente se relacionó con los contenidos de nitrógeno total, fósforo disponible y potasio extraíble, sostenidos en la relación directamente proporcional con la MO (39), este último con altos valores (> 4%) encontrados en este estudio. Es así que Sudharta *et al.* (5), reportaron que un aumento en el rendimiento de los granos de café no se correlacionó con la MO del suelo en la capa superficial, pero mostró una correlación directamente proporcional con el nitrógeno total e inversamente proporcional con el nitrógeno disponible. Sin embargo, bajos niveles de MO limitan la disponibilidad de nutrientes para una planta (21).

CONCLUSIONES

Se encontró una correlación no lineal entre el magnesio como catión intercambiable con el vigor vegetativo del café, para el arreglo café con paca en Espiritupata. Se encontró una correlación lineal entre la materia orgánica con el índice de vigor vegetativo del café, para el arreglo café con pino en una parcela de Chilachi. En la condición edafoforestal de café con paca en Espiritupata, se tuvo mayores niveles de producción de café pergamino seco e índice de vigor vegetativo del café. La implementación de arreglos agroforestales es imprescindible para la mejora y conservación del componente edáfico como sustento nutrimental del café.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Bauw P, Van Asten P, Jassogne L, Merckx R. Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt. Elgon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016; 231: 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.036>
- Maro G, Kilambo D, Kiwelu L, Mbwapbo S. Integrated soil fertility management practices for coffee in Tanzania: a review. *World Journal of Agricultural Research*. 2024; 12(1): 8-17. <https://doi.org/10.12691/wjar-12-1-2>
- Ferraz G, Avelar R, Bento N, Souza F, Ferraz P, Damasceno F, Barbari M. Spatial variability of soil fertility attributes and productivity in a coffee crop farm. *Agronomy Research*. 2019; 17(4): 1630-1638. <https://doi.org/10.15159/ar.19.142>
- Irawan S, Antriandarti E, Suprihatin D, Pangesti A. Study the relationship of soil fertility with land suitability for arabica coffee (*Coffea arabica* L.) development in Bandar sub-district, Pacitan district. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 1111(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012029>
- Sudharta K, Hakim A, Fadhilah M, Fadzil M, Prayogo C, Kusuma Z, Suprayogo D. Soil organic matter and nitrogen in varying management types of coffee-pine agroforestry systems and their effect on coffee bean yield. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 2022; 23(11). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d231142>
- Guimarães P, Reis T. Nutrição e adubação do cafeeiro. En Reis P, Cunha R (Eds.). *Café arábico: do plantio à colheita*. Epamig; 2010. p. 343-414. <https://n9.cl/i55id>
- Silva S, Lima J. Physical attributes of soil and its relation with space productivity of coffee arabic. *Coffee Science*. 2013; 8(4): 395-403. <https://n9.cl/k5n29w>
- Prasad P, Hariyappa N, Chandrashekar N, Manonmani G, Hareesh S, Nadaf S, Jagadeesan M, Venkatesh D, Sujatha K. Studies on soil fertility status of coffee growing regions in Wayanad district. *Journal of Plantation Crops*. 2018; 46(3): 180-189. <https://acortar.link/rvxN4C>
- Massawe P, Mrema J. Evaluation of the fertility status of the soils under coffee cultivation in Moshi rural district, Kilimanjaro region, Tanzania". *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2017; 3(4): 1-7. <https://doi.org/10.9734/AJEE/2017/33953>
- Carmo D, Nannetti D, Lacerda T, Nannetti A, Santo D. Micronutrients in soil and leaf of coffee plants under an agroforest system in the south of Minas Gerais. *Coffee Science*. 2012; 7(1): 76-83. <https://n9.cl/mqyyo>
- Cerda R, Avelino J, Harvey C, Gary C, Tixier P, Allinne C. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*. 2020; 134. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>

- 12.** Furey G, Tilman D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021; 118(49): e2111321118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111321118>
- 13.** Souza G, Carlette C, Silva S, Borghi E. Improvement of the soil quality under intercropped conilon coffee (*Coffea canephora* P.) in the coastal tablelands of southeast Brazil. *Acta Agronómica*. 2022; 71(3): 1-17. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.93941>
- 14.** SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). Datos hidrometeorológicos a nivel nacional. Ministerio del Ambiente; 2024. <https://n9.cl/r278uv>
- 15.** Martunis L, Dahliani L, Yana D. Analysis of physical and chemical characteristics of soil in coffee plantations in the Mount Puntang Social Forestry Area, West Java. *AMCA Journal of Science and Technology*. 2023; 3(1): 1-6. <https://doi.org/10.51773/ajst.v3i1.233>
- 16.** de Souza F, dos Santos J, dos Santos C, de Oliveira E, da Silva R, de Paula M, Alves J, Oliveira J, Rodrigues J, Martins W. Physical and chemical soil quality and litter stock in agroforestry systems in the eastern amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2025; 382: 109479. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109479>
- 17.** Gutierrez L, Lévano J. Efecto de sistemas agroforestales y monocultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en los indicadores físicos del suelo. *Investigación y Amazonía*. 2023; 13(16): 33-41. <https://n9.cl/6b36l>
- 18.** Villacis J, Almeida R, Amaral J, Vieira M, Ramos M, Taube P, Bessa R, Silva do Sacramento J, Cristi de Barros E, Tello R, Villacis N. Chemical soil attributes in different use systems, itacoatiara-am, Brazil. *Folia Amazónica*. 2021; 30(1): 49-59. <https://doi.org/10.24841/fa.v30i1.527>
- 19.** Alvarado C, Bobadilla L, Valqui L, Valqui G, Valqui-Valqui L, Vigo C, Vásquez H. Characterization of *Coffea arabica* L. parent plants and physicochemical properties of associated soils, Perú. *Heliyon*. 2022; 8(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10895>
- 20.** Cessa-Reyes V, Ruiz-Rosado O, Alcudia-Armida L. The coffee agroforestry system in Mexico. *Agro productividad*. 2020; 13(11). <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i11.1811>
- 21.** Morales V, Mora A, Virginio E, Villatoro M. Growth and productivity of *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 in different agroforestry systems in the caribbean region of Costa Rica. *Agriculture*. 2024; 14(10): 1723. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101723>
- 22.** Sileshi G, Mafongoya P, Nath A. Agroforestry systems for improving nutrient recycling and soil fertility on degraded lands. En Dagar JC, Gupta SR, Teketay D, editores. *Agroforestry for degraded landscapes*. Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0_8
- 23.** Dollinger J, Jose S. Agroforestry for soil health. *Agroforest Systems*. 2018; 92: 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- 24.** Dilas-Jiménez JO, Mugruza-Vassallo CA. Instalación de fincas cafetaleras en sistema agroforestal para recuperación y sostenibilidad de suelos degradados de selva alta. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*. 2020; 4(1): 8-18. <https://doi.org/10.25127/aps.20201.534>
- 25.** Silicuana N, Vidal S, Vargas G, Miranda R. Evaluación de la fertilidad del suelo en parcelas con dos diferentes manejos de hacer agricultura (sistema agroforestal sucesional y sistema convencional) en zona semiárida en la provincia Tapacarí - Cochabamba. *Apthapi*. 2018; 4(1): 962-970. <https://doi.org/10.53287/neci1984cy52h>
- 26.** Sarvade S, Singh R, Prasad H, Prasad D. Agroforestry practices for improving soil nutrient status. *Popular Kheti*. 2014; 2(1): 60-64. <https://acortar.link/vNIFN3>
- 27.** de Sousa L, de Souza V, de Paula J, Ferreira T, Bernabé A, Boone G, dos Santos Pereira L, Carriço E. The nutrient magnesium in soil and plant: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*. 2023; 35(8): 136-144. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i82890>

- 28.** Mengel K, Kirkby E. Principios de nutrición vegetal (1.a ed.). International Potash Institute; 2000. <https://acortar.link/1NJPxe>
- 29.** Xie K, Cakmak I, Wang S, Zhang F, Guo S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*. 2021; 9(2): 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>
- 30.** Yan B, Hou Y. Effect of soil magnesium on plants: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 170(2). <https://acortar.link/yNqXpK>
- 31.** Rosenstock N, Berner C, Smits M, Krám P, Wallander H. The role of phosphorus, magnesium and potassium availability in soil fungal exploration of mineral nutrient sources in Norway spruce forests. *New Phytologist*. 2016; 211: 542-553. <https://doi.org/10.1111/nph.13928>
- 32.** Senbayram M, Gransee A, Wahle V, Thiel H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. *Crop and Pasture Science*. 2015; 66(12): 1219-1229. <https://doi.org/10.1071/CP15104>
- 33.** Castro-Tanzi S. El calcio es un nutriente limitante en cafetales bajo manejo intensivo de fertilizantes en ultisoles. *Agronomía Costarricense*. 2017; 41(1): 105-119. <https://doi.org/10.15517/rac.v41i1.29756>
- 34.** Sadeghian S. La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*. 2016; 466: 1-12. <https://doi.org/10.38141/10779/0466>
- 35.** Laing W, Greer D, Sun O, Beets P, Lowe A, Payn T. Physiological impacts of Mg deficiency in *Pinus radiata*: growth and photosynthesis. *New Phytologist*. 2000; 146: 47-57. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00616.x>
- 36.** Ricci M, Alves B, Miranda S, Oliveira F. Growth rate and nutritional status of an organic coffee cropping system. *Scientia Agricola*. 2005; 62(2): 138-144. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000200008>
- 37.** da Silva V, Rabelo A, Fialho E, de Sá Mendonça E. Yield and nutritional status of the conilon coffee tree in organic fertilizer systems. *Revista Ciência Agronômica*. 2013; 44: 773-781. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000400014>
- 38.** Leite LFC, Iwata BDF, Araújo ASF. Soil organic matter pools in a tropical savanna under agroforestry system in northeastern Brazil. *Revista Árvore*. 2014; 38: 711-723. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400014>
- 39.** Khadka D. Assessment of relationship between soil organic matter and macronutrients, Western Nepal. *Journal of Biological, Pharmaceutical and Chemical Research*. 2016; 3: 4-12. <https://acortar.link/1Cca0N>