



## PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES IN SOILS WITH CROPS INTERCROPPED WITH COFFEE †

### [ATRIBUTOS FÍSICOS Y QUÍMICOS EN SUELOS CON CULTIVOS INTERCALADOS CON CAFÉ]

Dionicio Belisario Luis-Olivas<sup>1\*</sup>, Marcelo Antonio Tomaz<sup>2</sup>,  
José Francisco Teixeira-do Amaral<sup>2</sup>, Fábio Luiz-de Oliveira<sup>2</sup>,  
Wagner Nunes-Rodrigues<sup>3</sup>, Bruno Fardim-Christo<sup>4</sup>, Eroncio Mendoza-Nieto<sup>1</sup>,  
Tabita Abigail Gambini-de la Cruz<sup>1</sup> and Amanda Dutra-de Vargas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Av. Mercedes Indacochea  
609-Huacho, Lima, Perú. Email: [dluis@unjfsc.edu.pe](mailto:dluis@unjfsc.edu.pe), [emendozan@unjfsc.edu.pe](mailto:emendozan@unjfsc.edu.pe),  
[tgambini@unjfsc.edu.pe](mailto:tgambini@unjfsc.edu.pe)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n - Guararema,  
29500-000 Alegre - ES, Brasil. Email: [tomazamarcelo@yahoo.com.br](mailto:tomazamarcelo@yahoo.com.br),  
[jftamaral@yahoo.com.br](mailto:jftamaral@yahoo.com.br), [fabiocapi@yahoo.com.br](mailto:fabiocapi@yahoo.com.br); [amandadvargas@hotmail.com](mailto:amandadvargas@hotmail.com)

<sup>3</sup>Centro Universitário Unifacig, Av. Getulio Vargas 733, 36900-350 Manhuaçu-MG,  
Brasil. Email: [wagnernunes@outlook.com](mailto:wagnernunes@outlook.com)

<sup>4</sup>Agroconsult, Rodovia SC 401, Km 5, N° 4850, 88032-005 Florianópolis-SC, Brasil.  
Email: [brunochristo@hotmail.com](mailto:brunochristo@hotmail.com)

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background:** Studies that help to evaluate agroecosystems are of great importance for world agricultural production in order to achieve a more sustainable agriculture. **Objective:** To evaluate the physical and chemical attributes of the soil with crops intercropped with coffee. **Methodology:** The research was carried out on the property of a family farmer located in the municipality of Alegre, state of Espírito Santo, in southeastern Brazil. For this, three farming systems were defined: monoculture coffee, coffee intercropped with plantain, and coffee intercropped with plantain and hearts of palm. Five randomly selected experimental units were established in each system. The physical attributes were evaluated: texture and mechanical resistance of the soil; and chemical attributes: pH, P, K, Ca, Mg, Al+H, SB, CIC-e, CIC-T, %SB, %SA and MO. **Results:** Soil texture was similar in the three cultivation systems, however, the monoculture coffee soil had a higher percentage of sand and a lower percentage of clay. The mechanical resistance was similar between the culture systems in the two depths evaluated. Regarding chemical attributes, monoculture coffee presented higher values for pH, P, K, Ca and Mg, SB, CICE and %SB, and lower value for organic matter content. **Conclusion:** These results show that the physical and chemical attributes of the soil are affected by intercropping with coffee, so it is necessary to modify the agronomic management for these conditions.

**Key words:** *Coffea arabica*; organic matter; monoculture; cropping systems; polycultures.

#### RESUMEN

**Antecedentes:** Estudios que ayuden a evaluar los agroecosistemas son de gran importancia para la producción agrícola mundial a fin de alcanzar una agricultura sustentable. **Objetivo:** Evaluar los atributos físicos y químicos del suelo en cultivos intercalados con café. **Metodología:** La investigación se realizó en la propiedad familiar de un agricultor localizado en el municipio de Alegre, estado de Espírito Santo, al sureste de Brasil. Para ello se definieron tres sistemas de cultivo: café en monocultivo, café intercalado con plátano y café intercalado con plátano y palmito. En cada sistema se establecieron cinco unidades experimentales, seleccionadas aleatoriamente. Se evaluaron los atributos físicos: textura y resistencia mecánica del suelo; y atributos químicos: pH, P, K, Ca, Mg, Al+H, SB, CICE, CIC-T, %SB, %SA y MO. **Resultados:** La textura del suelo fue similar en los tres sistemas de cultivo, sin embargo, el suelo del café en monocultivo presentó mayor porcentaje en arena y menor en arcilla. La resistencia mecánica fue similar entre los sistemas de cultivo en las dos profundidades evaluadas. Con respecto a los atributos químicos, el café en monocultivo presentó mayores valores para pH, P, K, Ca y Mg, SB, CICE y %SB, y menor valor para el contenido de materia orgánica. **Conclusión:** Estos resultados demuestran que los atributos físicos y químicos del suelo se afectan con los cultivos intercalados con el café, por lo que es necesario modificar el manejo agronómico para esas condiciones.

**Palabras claves:** *Coffea arabica*; materia orgánica; monocultivo; sistemas de cultivos; policultivos.

† Submitted November 22, 2022 – Accepted April 24, 2023. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4633>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

## INTRODUCCIÓN

El café es considerado uno de los principales cultivos en el Brasil, y su explotación es en su mayoría en monocultivo por la facilidad que ofrece en el manejo y en la incorporación de nuevas tecnologías (Freitas, 2023). Sin embargo, esa forma de producción conduce a la homogenización de la biodiversidad, que resulta en la simplificación de los hábitats (Karp *et al.*, 2019). Ante ello, métodos de conservación que reduzcan esta homogeneidad son extremadamente necesarios implementar para sostener la biodiversidad en el futuro (Kremen y Merenlender, 2018).

El cultivo de una sola especie en el campo está progresando gradualmente hacia un enfoque multifuncional (Liu *et al.*, 2018). La sostenibilidad, así como la seguridad alimentaria, se puede lograr con la integración de la actividad agrícola y los árboles (Waldron *et al.*, 2017), con la generación de un sistema que utilice los materiales y la energía de manera más eficiente, aumentando así la productividad total. En este tipo de interacción, las funciones ecológicas de las especies pueden complementarse entre sí, con un uso absoluto de los recursos, como el suelo y la luz solar, conservando el agua y creando un microclima local, manteniendo la temperatura y la humedad del aire (Li *et al.*, 2018; Voltolini *et al.*, 2018). En ese sentido, un sistema productivo compuesto por más de una especie cultivada permite un mayor aprovechamiento del suelo, al formar una red de raíces de diferentes arquitecturas, que se expanden a diferentes profundidades del suelo, generando condiciones físicas y químicas que predisponen a las plantas a aprovechar los nutrientes del suelo de una forma más eficiente, y asegurando también un potencial mayor de la actividad biológica y ciclaje de nutrientes que en el monocultivo. Sin embargo, cuando la explotación agrícola es inadecuada se favorece la degradación del suelo, principalmente por la intensificación de los procesos de erosión y compactación, modificándose sus atributos físicos, químicos y biológicos, afectando de esta forma, los rendimientos de los cultivos y la conservación del suelo (Stefanoski *et al.*, 2013).

Los cultivos intercalados, además de generar beneficios ambientales y mejorar la rentabilidad de la propiedad familiar (Ohse *et al.*, 2012), representan una estrategia importante para mitigar los efectos negativos de los monocultivos, ya que pueden actuar sobre la calidad del suelo, con disminución de la erosión, además de aumentar la retención de agua, suavizar la escorrentía superficial y reducir la evaporación, debido a la cobertura del suelo por las hojas (Padovan *et al.*, 2017). Vallejo *et al.* (2018), evaluando diferentes

sistemas de cultivos (mono y policultivo) observaron que el monocultivo produjo deterioro de la calidad del suelo al incrementar la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración; así como la disminución del valor del pH y del contenido de carbono orgánico. Por ello, para hacer viable una agricultura responsable con uso de los recursos naturales y que asegure la producción de alimentos para las futuras generaciones, se requiere conocer las características del suelo para planear las actividades a desarrollar (Guimarães *et al.*, 2013).

La calidad del suelo puede estar determinada por sus características químicas, físicas y biológicas, además de la interacción entre ellas. Los criterios establecidos para los indicadores de calidad están relacionados con su función en el suelo, practicidad, accesibilidad, capacidad de respuesta a cambios de manejo, fácil interpretación y aplicabilidad en campo (Bünemann *et al.*, 2018; Lehmann *et al.*, 2020). En ese sentido, los atributos físicos y químicos del suelo pueden ser utilizados como indicadores de su calidad y permitir el monitoreo de las áreas que sufrieron el impacto de la agricultura. De esta forma, se aseguran intervenciones más racionales evitando desequilibrios ambientales (Prezotti y Guarçoni, 2013). Frente a este escenario, el objetivo de la investigación fue evaluar los atributos físicos y químicos del suelo con cultivos intercalados con el café.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue conducida en la localidad de Lagoa Seca, zona rural del municipio de Alegre, localizado en el estado de Espírito Santo, en el sureste de Brasil, en la propiedad familiar típicamente productora de café arábica, a una altitud de 740 msnm con las siguientes coordenadas geográficas: latitud sur 20°53'30" y longitud oeste 41°28'43".

El área estudiada se caracteriza por presentar topografía ondulada-accidentada, con suelo clasificado como Latosol Rojo-Amarillo. El clima de la región, de acuerdo con la clasificación de Köppen, es del tipo Cwa, caracterizado por tener verano lluvioso e invierno seco.

El estudio fue realizado en el cultivo del café arábica bajo tres sistemas de cultivo: a) café en monocultivo (CM); b) café intercalado con plátano (CP); y c) café intercalado con plátano y palmito (CPPa). La variedad de café arábica utilizado fue "Catuaí Rojo IAC 44", de frutos rojos, plantado en 1991, con líneas de cultivo en curva de nivel orientadas hacia el oeste, con espaciamiento de 3 m entre líneas y 2 m entre hoyos,

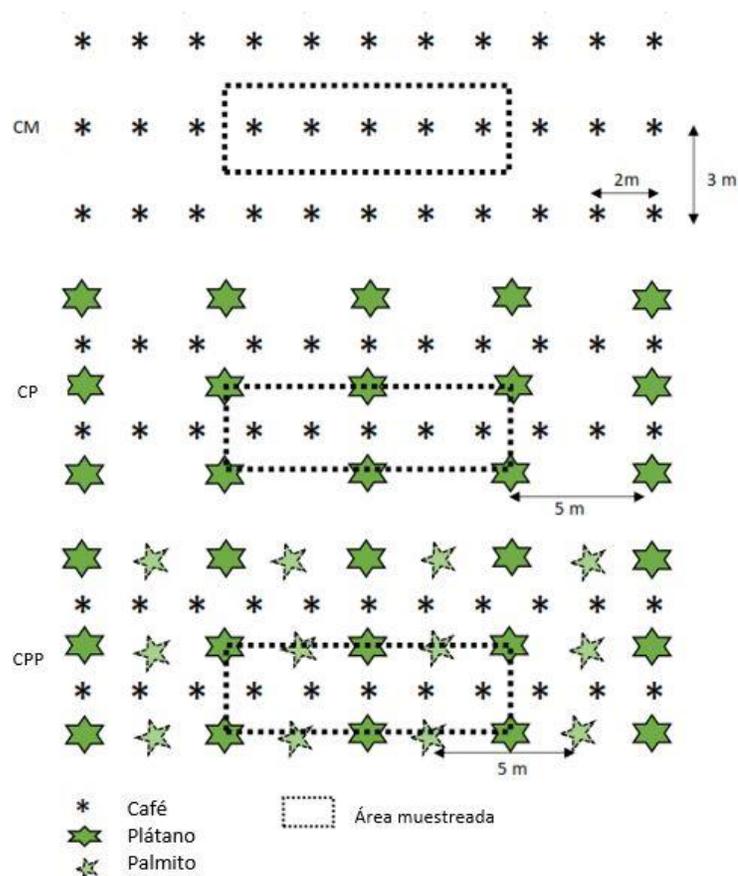
con dos plantas por hoyo. En el 2010 fue realizada la poda tipo descote bajo y efectuado el plantío de plátano (*Musa* sp. var. nanicón) en las entrelíneas del café, con en el espaciamiento 5 m x 3 m. De la misma forma, en el 2013 en las mismas líneas del plátano y entre ellas, se plantó palmito (*Euterpe edulis*) con el espaciamiento 5 m x 3 m (Figura 1).

La conducción del cultivo siguió las recomendaciones propuestas para café arábica por Reis y Cunha (2010). Para el manejo nutricional se corrigió la acidez del suelo aplicando 0.9 toneladas de caliza dolomítica por hectárea. Después de un mes, se realizó la primera fertilización con macro y micronutrientes, realizándose dos aplicaciones más (diciembre y febrero), de acuerdo con la recomendación para café arábica en el estado de Espírito Santo (Prezotti *et al.*, 2007), estableciendo niveles nutricionales adecuados para el café y estandarizados entre las unidades experimentales, aplicando así 300 gramos por planta de fertilizante formulado (22-05-10), que contiene N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O y micronutrientes.

Los cultivos se desarrollaron en condiciones de secano.

Desde el año 2013 no se utiliza productos químicos para el control de las plagas y enfermedades. Las plantas dañinas son controladas manualmente cuando inician la floración y dejadas sobre la superficie del suelo para que actúen como protección y ciclaje de nutrientes.

En cada sistema fueron establecidos cinco unidades experimentales de 30 m<sup>2</sup> de área, seleccionadas aleatoriamente dentro del sistema de cultivo. Las muestras de suelo fueron recolectadas en el mes de agosto de 2016, antes del inicio de la campaña 2016/2017. La recolección del suelo se realizó en ocho puntos diferentes de cada unidad experimental (cuatro en cada lado de la línea de las plantas) en la proyección de la copa del café, en la profundidad de 0-20 cm, donde se encuentran el 90% de las raíces del café arábica. La herramienta utilizada para el muestreo fue el barreno tipo holandés. El suelo fue homogenizado y colocado en sacos plásticos identificados y enviados al Laboratorio de Suelos del Centro de Ciencias Agrarias e Ingenierías de la Universidad Federal de Espírito Santo (CCAIE-UFES), para los respectivos análisis físicos y químicos.



**Figura 1.** Representación esquemática de los sistemas de cultivo; (CM) plantación de café en monocultivo; (CP) café intercalado con plátano; y (CPPa) café intercalado con plátano y palmito.

Los análisis físicos y químicos se realizaron según la metodología desarrollada por la EMBRAPA (1997). Para el análisis granulométrico (arcilla, limo y arena) se utilizó el método de la pipeta con agitación lenta. Mientras que para los análisis químicos fueron las siguientes: pH en agua, relación 1:2.5 (suelo: agua); fósforo (P) con extractor Mehlich<sup>-1</sup> y determinado por colorimetría; potasio (K) disponible obtenido por Mehlich<sup>-1</sup> y determinado por espectrofotometría de llama; calcio (Ca) y magnesio (Mg) extraído con KCl 1 mol/L y determinados por espectrometría de absorción atómica; aluminio (Al) extraído con KCl 1 mol/L y determinado por titulometría; acidez potencial (H+Al) extraído por acetato de calcio 0.5 mol/L pH 7.0 y determinado por titulometría; materia orgánica (MO), obtenida por oxidación de carbono vía húmeda con dicromato de potasio en medio ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Los valores de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se calcularon a pH 7. Además, se calcularon saturación de bases (SB), porcentaje de saturación de bases (%SB) y capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe).

Para la evaluación de la resistencia mecánica del suelo a la penetración, se procedió a medir en cuatro puntos (dos en cada lado de la línea de la planta) en la proyección de la copa de café de cada unidad experimental y hasta una profundidad de 40 cm, con el penetrómetro (PenetroLOG Falker).

### Análisis Estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron los análisis estadísticos descriptivos. Para cada variable se obtuvo

la media, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo y coeficiente de variación. La normalidad de la distribución de los datos fue probada con el test de Shapiro-Wilk al 5% de probabilidad, y los coeficientes de simetría y curtosis de las distribuciones fueron estimados, empleando las referencias a 0 y 3, respectivamente. Los análisis se realizaron con ayuda del programa estadístico SISVAR (Ferreira, 2019). Para la comparación de las medias de las variables entre los sistemas de cultivos se utilizaron las medias y los intervalos de confianza (95%) (Pimentel y García, 2002), considerándose similar cuando se observase sobreposición de los intervalos de confianza (Payton *et al.*, 2000).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Atributos físicos del suelo

#### Textura

En la Tabla 1 se observa que, para los porcentajes de arcilla y arena, los datos mostraron distribución normal con asimetría negativa y curtosis leptocúrtica; en tanto que, para el porcentaje de limo, la asimetría fue negativa con curtosis platicúrtica. Comparando los sistemas de cultivo, a pesar de que la clase textural sigue siendo la misma, es posible observar que el manejo diferenciado de los cultivos en el tiempo ha generado cambios en los porcentajes de arena y arcilla. Así, el café en monocultivo ha presentado mayor porcentaje en arena y menor en arcilla; en tanto que, en los sistemas intercalados se aprecia menor porcentaje en arena y mayor en arcilla.

**Tabla 1. Características físicas de suelo en tres sistemas de cultivo: café en monocultivo (CM), café intercalado con plátano (CP) y café intercalado con plátano y palmito (CPPa), campaña 2016/2017, Alegre – ES.**

Sistemas de cultivo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Máximo	60.00	6.00	51.00	--
Mínimo	43.00	4.00	34.00	--
Media general	51.87	5.33	42.80	--
CV (%)	7.50	11.57	9.25	--
W <sub>calculado</sub>	0.94 <sup>N</sup>	0.77	0.97 <sup>N</sup>	--
Asimetría	-0.21	-0.28	-0.10	--
Curtosis	3.70	2.34	3.50	--
Media: CM	55.40 ± 2.59 <sup>a</sup>	5.80 ± 0.45 <sup>a</sup>	38.80 ± 2.77 <sup>c</sup>	Arcillosa
Media: CP	51.60 ± 1.95 <sup>b</sup>	4.80 ± 0.45 <sup>b</sup>	43.40 ± 1.82 <sup>b</sup>	Arcillosa
Media: CPPa	48.60 ± 3.58 <sup>b</sup>	5.40 ± 0.55 <sup>ab</sup>	46.00 ± 3.24 <sup>a</sup>	Arcillosa

<sup>N</sup> La muestra proviene de una población con distribución normal, por el test de Shapiro-Wilk (W<sub>calculado</sub>), a 5% de probabilidad. Referencias para estimadores de asimetría y curtosis siendo 0 y 3, respectivamente. Medias con una letra común no son significativamente diferentes, según la metodología de Payton (2000). Cada media sigue su respectiva desviación estándar (±).

Estos resultados dejan en evidencia que la presencia de más de una especie cultivada en la misma área influye en los atributos físicos del suelo. Así, el mayor porcentaje de arcilla observado en los sistemas intercalados puede explicarse por la presencia de material orgánico sobre la superficie del suelo, que retiene los coloides arrastrados por el agua de la lluvia, teniendo en cuenta que estos sistemas de cultivos se encuentran en terrenos inclinados y que vienen siendo trabajados desde el año 2013. La presencia del plátano y palmito, como cultivos intercalados, no solo disminuyen la capacidad erosiva de las gotas de lluvia al disipar su energía cinética (Ferreira *et al.*, 2010), sino que también incrementan el contenido de materia orgánica (fracción coloidal), la que finalmente contribuye a la formación y estabilidad de la estructura del suelo (Zuñiga *et al.*, 2014).

Originalmente, el café se cultivaba a la sombra, forma que fue cambiando progresivamente debido al deseo de aumentar la productividad de las áreas agrícolas. Sin embargo, la reducción de árboles en las plantaciones de café aumenta la vulnerabilidad del suelo a la erosión y la escorrentía (Nguyen *et al.*, 2020). Al ser el suelo un recurso natural finito, prevalece la erosión, siendo uno de los grandes problemas ambientales con mayor dificultad de control (Gupta, 2019). Con el proceso de erosión se pierde la capa más fértil rica en materia orgánica, afectando la calidad y como consecuencia se produce la degradación del suelo (Cerdeira *et al.*, 2018; Rodrigo-Comino *et al.*, 2018; Fenta *et al.*, 2021). Así, hay una reducción en la capacidad productiva del suelo y, posiblemente, riesgos para la seguridad alimentaria (Hurni *et al.*, 2015). Según algunas investigaciones, debido al gran riesgo de erosión en las zonas y la inminente ola de cambio climático, que puede incrementar las pérdidas de suelo, es de suma importancia la necesidad de aplicar estrategias de conservación y uso adecuado del suelo (Raj *et al.*, 2022). Una de las formas de utilizar los suelos para la producción agrícola y, al mismo tiempo, promover la conservación, es el uso de los cultivos intercalados.

El intercalado de diferentes cultivos en una misma zona busca mejorar la calidad del suelo, aprovechar el agua y mantener los agroecosistemas, ya que aumenta el aporte de residuos vegetales, aumentando así la biodiversidad (Du *et al.*, 2022). Por lo tanto, se puede restaurar la salud del suelo, debido a la formación y estabilidad de los agregados, lo que ocurre en presencia de materia orgánica, promoviendo una biota del suelo más dinámica y saludable (Fahad *et al.*, 2022). Además de controlar las pérdidas por erosión, la presencia de árboles en el cultivo optimiza el uso del agua, los nutrientes y la luz solar, además de realizar el secuestro de carbono y mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo (Zhu *et al.* 2018; Carretta *et al.*

2018; Mortimer *et al.* 2018; Wolz *et al.* 2018; Pavlidis *et al.*, 2018). Trabajos desarrollados por diferentes autores han encontrado que cultivos intercalados con el café reducen la pérdida de suelo en comparación al café en monocultivo (Mancuso *et al.*, 2013). Algunos estudios indican que además de paliar las pérdidas de suelo, también se reduce la contaminación del agua (Dollinger *et al.*, 2019) y existen beneficios tanto para las condiciones edáficas como microclimáticas (Gomes *et al.*, 2016).

### Resistencia mecánica del suelo a la penetración

En la Tabla 2 se presentan los valores para la resistencia mecánica del suelo a la penetración. A 20 cm de profundidad, la media fue de 1378.18 kPa con un rango de variación entre 1618.00 y 1254.50 kPa. Los datos presentaron distribución normal asimétrica positiva y platicúrtica, lo que indica que hay una mayor tendencia a observar valores menores a la media. A 40 cm de profundidad, la media fue de 1390.83 kPa y los valores de resistencia variaron entre 1892.75 y 1146.25 kPa. Los datos presentaron distribución asimétrica positiva y leptocúrtica, lo que indica que hay una mayor tendencia a observar valores menores a la media.

Hay algunos atributos que se utilizan para evaluar indirectamente la calidad física del suelo, que pueden cambiar según el uso y el tipo de manejo empleado, como la porosidad, la densidad, la estabilidad de los agregados, la infiltración de agua y la resistencia a la penetración. Este último es de gran importancia y está relacionado con algunas características del suelo, como la densidad y la humedad (Frozzi *et al.*, 2018). Sirve como una indicación de la compactación y los posibles cambios que ocurren en los atributos físicos. Algunos manejos intensivos de preparación del suelo pueden conducir a tales modificaciones, así como a la translocación de arcilla y, en consecuencia, a la compactación del suelo. Como resultado, el potencial productivo de los cultivos puede verse reducido, además de provocar la degradación del suelo a estados más avanzados (Silva *et al.*, 2017).

Comparando los sistemas de cultivo, en ambas profundidades se aprecia que no se evidenciaron diferencias entre ellos, lo que indica que la presencia de dos o más cultivos no está influyendo en la variación de esta característica, debido posiblemente a la dificultad de sus sistemas radiculares de explorar mayor volumen de suelo por el alto contenido de arcilla (Blomme *et al.*, 2006). Estos valores determinados están por debajo del nivel crítico (< 5500 kPa). Entiéndase que, valores superiores a este umbral no son adecuados para el desarrollo de las plantas del café, porque pueden proporcionar serias limitaciones para el buen desarrollo de las raíces, asociados posiblemente

**Tabla 2. Resistencia mecánica del suelo a la penetración (kPa) en tres sistemas de cultivo: café en monocultivo (CM), café intercalado con plátano (CP), café intercalado con plátano y palmito (CPPa), campaña 2016/2017, Alegre – ES.**

Sistemas de cultivo	Resistencia mecánica del suelo (kPa)	
	00 - 20 cm	20 - 40 cm
Máximo	1618.00	1892.75
Mínimo	1254.50	1146.25
Media general	1378.18	1390.83
CV (%)	8.33	13.06
$W_{\text{calculado}}$	0.88 <sup>N</sup>	0.87
Asimetría	0.91	1.37
Curtosis	2.87	4.92
Media: CM	1349.55 ± 85.85 <sup>a</sup>	1532.90 ± 232.47 <sup>a</sup>
Media: CP	1455.65 ± 154.93 <sup>a</sup>	1293.40 ± 142.27 <sup>a</sup>
Media: CPPa	1329.33 ± 56.79 <sup>a</sup>	1346.20 ± 39.20 <sup>a</sup>

<sup>N</sup> La muestra proviene de una población con distribución normal, por el test de Shapiro-Wilk ( $W_{\text{calculado}}$ ), a 5% de probabilidad. Referencias para estimadores de asimetría y curtosis siendo 0 y 3, respectivamente. Medias con una letra común no son significativamente diferentes, según la metodología de Payton (2000). Cada media sigue su respectiva desviación estándar ( $\pm$ ).

también a otros factores como el aumento de la densidad del suelo y la microporosidad, lo que causaría una reducción de las actividades químicas y biológicas en el suelo (Camargo y Alleoni, 1997). Souza *et al.* (2017) observaron que los cafetos intercalados tenían menor resistencia a la penetración en comparación con el sistema de monocultivo, concluyendo que el uso de cultivos intercalados puede mejorar la calidad física de los suelos (Arevalo-Hernandez *et al.*, 2016).

### Atributos químicos del suelo

En la Tabla 3 se presentan las características químicas de suelo de los tres sistemas de cultivo. Nótese que la mayoría de las variables presentaron distribución normal asimétrica positiva y platicúrtica.

Observando los resultados por sistema de cultivo, se aprecia que el café en monocultivo sobresalió por presentar los mayores valores para pH, P, K, Ca, Mg, SB, CIC-e y %SB; y menores para Al+H, %SAI y MO. En los cultivos intercalados, se registraron los mayores porcentajes de materia orgánica.

El uso del suelo y la forma en que se maneja también tienen una fuerte influencia en los atributos químicos, ya que pueden ocurrir cambios en la cantidad de materia orgánica presente y, por lo tanto, aumentar o reducir la disponibilidad de nutrientes y resultar en diferentes cambios químicos (Freitas *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2017). Algunos de los atributos que se utilizan en las investigaciones para dar fe de la calidad del suelo son los niveles de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico, la acidez, entre otros. El

contenido de materia orgánica, además de estar relacionado con todos los atributos mencionados, también juega un papel importante en el almacenamiento y suministro de minerales (Almeida *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2016).

### pH

Se aprecia también que, los valores de pH están relacionados inversamente a la presencia de acidez potencial (Al + H) y aluminio (Al), ya que a menor valor de pH le corresponde mayor valor de acidez potencial y Al, tal como lo confirman Ebeling *et al.* (2008). Así, los menores valores de pH y mayores valores de acidez potencial correspondieron a los suelos con los cultivos intercalados. Esta tendencia podría explicarse por la liberación de CO<sub>2</sub>, producto de la respiración radicular y la descomposición lenta de la materia orgánica, que al disolverse en el agua forman carbonatos y liberan hidrógenos que van a ocupar los sitios intercambiables de los complejos arcillo húmicos produciendo lixiviación de nutrientes y acidificación del agua del suelo (Klug *et al.*, 2020). Los suelos que presentan pH menores a 5 no son adecuados para el cultivo del café y su corrección mediante el encalado se torna difícil cuando se tienen cultivos ya establecidos, porque puede dañar el sistema radicular cuando se quiere incorporar hasta 20 cm de profundidad (Figueiredo *et al.*, 2013) por lo que se requiere de mayor cuidado en la práctica (Ferreira *et al.*, 2013). Suelos con pH menores de 5.5 presentan menor disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg, S y Mo, mientras que el contenido de Al se incrementa (Prezotti y Guarçoni, 2013).

**Tabla 3. Características químicas de suelo en tres sistemas de cultivo: café en monocultivo (CM), café intercalado con plátano (CP), café intercalado con plátano y palmito (CPP), campaña 2016/2017, Alegre – ES.**

Sistema de cultivo	pH	P	K	Ca	Mg	Al +H
		----- mg.dm <sup>-3</sup> -----			----- cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> -----	
Máximo	6.37	4.54	94.00	2.23	1.37	6.27
Mínimo	4.61	1.05	25.00	0.36	0.61	1.48
Media general	5.20	2.22	64.93	1.12	0.90	3.84
CV (%)	9.99	43.77	35.90	49.66	26.13	37.18
W <sub>calculado</sub>	0.87	0.90 <sup>N</sup>	0.93 <sup>N</sup>	0.93 <sup>N</sup>	0.89 <sup>N</sup>	0.97 <sup>N</sup>
Asimetría	1.11	0.97	-0.39	0.69	0.89	0.04
Curtosis	3.30	3.16	1.91	2.61	2.69	1.97
Media: CM	5.75 ± 0.51 <sup>a</sup>	2.77 ± 0.39 <sup>a</sup>	80.80 ± 14.69 <sup>a</sup>	1.69 ± 0.49 <sup>a</sup>	1.15 ± 0.22 <sup>a</sup>	2.74 ± 0.65 <sup>b</sup>
Media: CP	4.96 ± 0.25 <sup>b</sup>	2.13 ± 0.85 <sup>ab</sup>	60.60 ± 25.97 <sup>ab</sup>	0.64 ± 0.26 <sup>b</sup>	0.75 ± 0.12 <sup>b</sup>	3.32 ± 1.14 <sup>b</sup>
Media: CPPa	4.89 ± 0.21 <sup>b</sup>	1.74 ± 0.53 <sup>b</sup>	53.40 ± 22.52 <sup>b</sup>	1.01 ± 0.23 <sup>ab</sup>	0.79 ± 0.11 <sup>b</sup>	5.46 ± 0.53 <sup>a</sup>
Sistema de cultivo	SB	CIC-e	CIC-T	%SB	%SAl	MO
		----- cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> -----		----- % -----		dag.kg <sup>-1</sup>
Máximo	3.85	3.85	7.99	66.98	45.30	2.64
Mínimo	1.16	1.91	2.90	21.57	0.00	1.84
Media general	2.18	2.62	6.02	37.37	18.28	2.35
CV (%)	37.07	22.82	22.41	37.99	83.61	9.83
W <sub>calculado</sub>	0.90 <sup>N</sup>	0.91 <sup>N</sup>	0.94 <sup>N</sup>	0.88 <sup>N</sup>	0.93 <sup>N</sup>	0.91 <sup>N</sup>
Asimetría	0.86	0.79	-0.54	0.85	0.27	-0.84
Curtosis	2.70	2.48	3.16	2.48	1.78	2.75
Media: CM	3.06 ± 0.72 <sup>a</sup>	3.10 ± 0.67 <sup>a</sup>	5.80 ± 0.27 <sup>b</sup>	52.63 ± 11.75 <sup>a</sup>	1.66 ± 2.28 <sup>a</sup>	2.07 ± 0.16 <sup>b</sup>
Media: CP	1.55 ± 0.35 <sup>b</sup>	2.11 ± 0.18 <sup>b</sup>	4.87 ± 1.34 <sup>c</sup>	33.25 ± 9.29 <sup>b</sup>	27.12 ± 11.26 <sup>b</sup>	2.53 ± 0.09 <sup>a</sup>
Media: CPPa	1.94 ± 0.33 <sup>b</sup>	2.65 ± 0.39 <sup>ab</sup>	7.40 ± 0.62 <sup>a</sup>	26.23 ± 3.66 <sup>b</sup>	26.05 ± 12.92 <sup>b</sup>	2.46 ± 0.08 <sup>a</sup>

<sup>N</sup>La muestra proviene de una población con distribución normal, por la prueba de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidad. Referencias para estimadores de asimetría y curtosis siendo 0 e 3, respectivamente. SB: Suma de bases intercambiables; CIC-e: Capacidad de intercambio catiónico efectivo; CIC-T: Capacidad de intercambio catiónico a pH 7; %SB: Porcentaje de saturación de bases; %SAl: Porcentaje de saturación de aluminio; MO: Materia orgánica. Medias con una letra común no son significativamente diferentes, según la metodología de Payton (2000). Cada media sigue su respectiva desviación estándar (±).

### Contenidos de P, K, Ca y Mg

Para los elementos P, K, Ca y Mg, los mayores contenidos fueron encontrados en el suelo en monocultivo, seguido del cultivo de café intercalado con el plátano. Esto es explicable porque al aumentar la diversificación del sistema agrícola, la demanda por los nutrientes del suelo se incrementó, quedando menores cantidades disponibles en el suelo. Además, el encalado y la fertilización estuvieron dirigidas solamente a las plantas de café, situación que determina mayor competencia por los nutrientes entre las especies involucradas en la asociación de los cultivos. En esas condiciones, se requiere de un buen

manejo de las especies comprendidas, a fin de reducir al mínimo la competencia y obtener la máxima complementariedad entre ellas (Altieri y Nicholls, 2000). El intercalado entre cultivos tiene como objetivo lograr un mayor rendimiento por área, provocando un menor impacto, ya que proporciona el uso más eficiente de los insumos y recursos naturales que se utilizan en el proceso de producción, lo que redundará en beneficios para la agricultura (Hendges *et al.*, 2018). Para alcanzar el éxito, es fundamental estudiar los tipos de cultivos que se utilizarán en este tipo de sistemas y, principalmente, la forma de gestión que se implementará (Ferreira *et al.*, 2014). Así, la eficiencia corresponderá en gran medida a la

complementariedad entre especies (Bertolino *et al.*, 2021).

### Valores de SB, CIC-e y %SB

Los valores de suma de bases intercambiables (SB), capacidad de intercambio catiónico efectivo (CIC-e) y porcentaje de saturación de bases (%SB), fueron menores en los sistemas con cultivos intercalados. Estas características del suelo afectan la calidad de la planta y la productividad del café, por lo que tienen que ser mejoradas a través del encalado y la fertilización. Para un buen crecimiento de los cultivos, lo ideal es que no haya aluminio en el suelo, es decir, que el porcentaje de saturación de aluminio sea igual a cero (Prezotti y Guarçoni, 2013). Los sistemas con cultivos intercalados presentaron mayores porcentajes de saturación de aluminio, como consecuencia del inadecuado encalado.

### Contenido de Materia Orgánica

Con respecto al contenido de materia orgánica, el mayor porcentaje correspondió a los sistemas con cultivos intercalados. Esto es explicable porque los restos de los vegetales, tanto del café y de los otros cultivos, van quedando sobre la superficie del suelo, los que se van descomponiendo en el tiempo por la acción de los factores ambientales como las lluvias, temperaturas, entre otros. Además, en estos sistemas hay una mayor producción de biomasa, la que contribuye a la protección del suelo, lo cual ayuda a reducir el proceso de erosión y, en algunos casos, a mejorar la fertilidad (Melloni *et al.*, 2018). Las condiciones del suelo se pueden mejorar con el aporte continuo de materia orgánica, que también servirá como fuente de energía para las poblaciones de microorganismos que realizan funciones importantes en el suelo (Stefanoski *et al.*, 2013). Este hecho es evidente debido al aumento de la actividad microbiana y aumento de micorrizas en plantas de café intercaladas en comparación con el monocultivo (Pavan *et al.*, 2018). Entre las diferentes partes de los residuos de plantas que se pueden aportar, las hojas tienen los niveles más altos de nutrientes y pueden contribuir con más del 70% de los residuos agregados (Carvalho *et al.*, 2017; Urbano *et al.*, 2018), así como cuanto mayor sea el número de plantas en la misma área para depositar restos vegetales, más beneficios se pueden generar.

Otra función importante ligada a la materia orgánica está relacionada con la formación y estabilidad de los agregados del suelo, lo que ejerce una profunda influencia, cambiando las interacciones entre las partículas y la descomposición de los agregados durante el proceso de agregación (Li *et al.*, 2023). Además, los agregados estables son esenciales para

mejorar la permeabilidad y, en consecuencia, reducir la erosión del suelo (Yu, *et al.* 2020). El aumento de la estabilidad de estos agregados por acción de la materia orgánica se da por la acción cementante y aglomerante que ésta ejerce sobre las partículas minerales (Ferrari Neto *et al.*, 2021; Momesso *et al.*, 2022), demostrando el importante papel que juega un papel en las propiedades del suelo, mejorando las condiciones físicas, químicas y biológicas (Dhaliwal *et al.*, 2019).

### CONCLUSIÓN

Los sistemas con cultivos intercalados con café influyen en los atributos físicos y químicos del suelo. Con respecto a la textura, en los sistemas intercalados se observaron mayores contenidos de arcilla y menores contenidos de arena, característica importante para la prevención de la erosión, en comparación con el monocultivo. La resistencia mecánica del suelo a la penetración no fue influenciada por los sistemas de cultivo. Para los contenidos de pH, Mg, SB, %SB y %SAI, el monocultivo presentó promedios más altos, en cuanto a los contenidos de P, K, Ca y CIC-e, junto con el monocultivo, los cultivos intercalados también presentaron promedios más altos (sistema CP en las dos primeras variables y sistema CPPa en las dos últimas variables). El sistema de cultivo intercalado CPPa también mostró promedios más altos para los contenidos de Al + H y CIC-T. Y para el contenido de MO, destacaron los cultivos intercalados con promedios más altos en comparación con el monocultivo. Estos resultados sugieren que debe prestarse mayor atención al manejo agronómico cuando se establecen cultivos intercalados, modificándose algunas actividades dentro de ella, como es el caso de la corrección del pH mediante el encalado y fertilización adecuado del cultivo cuando el suelo es ácido y pobre en nutrientes.

### Agradecimiento

To the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the doctoral scholarship of the first author.

**Funding.** Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) provided financial support for the research. The Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) provided a doctoral scholarship of the first author.

**Conflict of interest statement.** There is no conflict of interest.

**Compliance with ethical standards.** Does not apply.

**Data availability.** Data available from the author upon reasonable request

**Author contribution statement (CRediT). D.B.L. Olivas** - Conceptualization, investigation, project administration, writing–review & editing. **M.A. Tomaz** - Conceptualization, funding acquisition, supervision, writing–review & editing. **J.F.T do Amaral** - Conceptualization, funding acquisition, supervision, writing–review & editing. **F.L. de Oliveira** - Conceptualization, funding acquisition, supervision, writing–review & editing. **W.N. Rodrigues** - Formal Analysis, methodology. **B.F. Christo** - investigation, project administration, writing–review & editing. **E.M. Nieto** - Writing – review & editing. **T.A.G. de la Cruz** - Writing – review & editing. **A.D. de Vargas** - Writing – review & editing.

## REFERENCIAS

- Almeida, L.S., Ferreira, V.A.S., Fernandes, L.A., Frazão, L.A., Oliveira, A.L.G. and Sampaio, R.A., 2016. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), pp. 1539-1547. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900053>
- Altieri, M. and Nicholls, C., 2000. Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable. México D.F., México: PNUMA.
- Arevalo-Hernandez, C.O., Paiva, A.Q., Mizuki, T., Almeida, A.J.G., Uzêda, M.C. and Matos, E.N., 2016. Aspectos físicos da qualidade do solo sob sistemas agroflorestais e pastagem no sul da Bahia. *Agrotropica*, 28(1), pp. 55 – 64. <http://dx.doi.org/10.21757/0103-3816.2016v28n1p55-64>
- Bertolino, K.M., Duarte, G.R.B., Vasconcelos, G.M.P.V. and Botre, E.P., 2021. Desempenho de crotalaria consorciada com milho na produção de biomassa. *ForScience*, 9(1), pp. e00895. <https://doi.org/10.29069/forscience.2021v9n1.e895>
- Blomme, G., Swennen, R., Ortiz, R. and Tenkouano, A., 2006. Sistema radical y crecimiento de brotes de banana (*Musa spp.*) en dos zonas agroecológicas de Nigeria. *Infomusa*, 15(1-2), pp.18-23. <https://www.musalit.org/seeMore.php?id=14445>
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., de Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Van Groenigen, J.W. and Brussaard, L., 2018. Soil quality: a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, pp. 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Camargo, O.A. and Alleoni, L.R.F., 1997. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. São Paulo, Brasil: Ed. dos autores.
- Carretta, L., Cardinali, A., Zanin, G. and Masin, R., 2018. Effect of vegetative buffer strips on herbicide runoff from a nontilled soil. *Soil Science*, 182, pp. 285–291. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000221>
- Carvalho, D.C., Pereira, M.G., Toledo, L.O. Simon, C.A. Rodrigues, J.S., Fernandes, J.C.F. and Silva Neto, E.C., 2017. Ciclagem de nutrientes de um plantio de eucalipto em regeneração de espécies nativas no sub-bosque. *Revista Floresta*, 47(1), pp. 17-27. <http://dx.doi.org/10.5380/RF.V47I1.43652>
- Cerda, A., Rodrigo-Comino, J., Giménez-Morera, A. and Keesstra, S.D., 2018. Hydrological and erosional impact and farmer's perception on catch crops and weeds in citrus organic farming in Canary Islands river watershed, Eastern Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, pp. 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.015>
- Dhaliwal, S.S., Naresh, R.K., Mandal, A., Singh, R. and Dhaliwal, M.K., 2019. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>
- Dollinger, J., Lin, C.H., Udawatta, R.P., Pot, V., Benoit, P. and Jose, S., 2019. Influence of agroforestry plant species on the infiltration of S-Metolachlor in buffer soils. *Journal of contaminant hydrology*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.103498>
- Du, X., Jian, J., Du, C. and Stewart, R.D., 2022. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), pp. 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.00>
- Ebeling, A.G., Dos Anjos, L.H.C., Perez, D.V., Pereira, M.G. and Valladares, G.S., 2008. Relação entre

- acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*, 67(2), pp. 429-439. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000200019>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério da Agricultura e do Abastecimento.
- Fahad, S., Chavan, S.B., Chichaghare, A.R., Uthappa, A.R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D.K., Kumar, V., Farooq, T.H., Ali, B., Sawant, A.V., Saud, S., Chen, S. and Pocza, P., 2022. Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su142214877>
- Fenta, A.A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Tsubo, M., Yasuda, H., Kawai, T., Ehabu, K., Berihun, M.L., Belay, A.S. and Sultan, D., 2021. Agroecology-based soil erosion assessment for better conservation planning in Ethiopian river basins. *Environmental Research*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110786>
- Ferrari Neto, J., Franzluebbbers, A.J., Cruscio, C.A.C., Rigon, J.P.G., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., Nascimento, C.A.C. and Ribeiro, L.C., 2021. Soil carbon and nitrogen fractions and physical attributes affected by soil acidity amendments under no-till on Oxisol in Brazil. *Geoderma*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2020.e00347>
- Ferreira, R.R.M., Filho, J.T. and Ferreira V.M., 2010. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. *Semina*, 31(4), pp. 913-932. URL: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/sema-grarias/article/viewFile/7597/6687>
- Ferreira, J.T.P., Ferreira, E.P., Oliveira, M.P., Silva, G.S.S., Oliveira Filho, J.S. and Santos, J.W.G., 2013. Avaliação da fertilidade dos solos cultivados com café conilon (*Coffea canephora*) no município de Santa Teresa – ES. *Enciclopédia Biosfera*, 9(16), pp. 356-366. URL: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/agrarias/avaliacao%20da%20fertilidade.pdf>
- Ferreira, N.C., Seleguini, A., Seno, S. and Faria Júnior, M.J.A., 2014. Produção e qualidade de inflorescências de couve-flor em função da densidade de plantio. *Revista de Agricultura Neotropical*, 1(2), pp. 1-7. URL: <https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/13894/5/Artigo%20-%20Nozimary%20Carneiro%20Ferreira%20-%20202014.pdf>
- Ferreira, D.F., 2019. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, 37 (4), pp. 529-535. <http://dx.doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Figueiredo, V.C., Mantovani, J.R., Leal, R.M. and Miranda, J.M., 2013. Levantamento da fertilidade do solo de lavouras cafeeiras em produção, no sul de Minas Gerais. *Coffee Science*, 8(3), pp. 306-313. <https://doi.org/10.25186/cs.v8i3.449>
- Freitas, L., Oliveira, I.A., Silva, L.S., Frare, J.C.V., Filla, V.A. and Gomes, R.P., 2017. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Unimar Ciências*, 26(1), pp. 8-25. URL: <http://ojs.unimar.br/index.php/ciencias/article/view/511>
- Freitas, A.F., Fonseca, A.J., Lordelo, M.M., Rodrigues, G., Pereira, R., Aparecida, V., 2023. Agronomic performance and productivity of Arabica coffee intercropped with timber species. *Revista Ceres*, 70(2), pp. 73-80. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370020009>
- Frozzi, J.C., Bergamin, A.C., Cunha, J.M., Campos, M.C.C., Lima, A.F.L., Brito, W.B.M., Lourenço, I.H. and Silva, W.L.M., 2018. Atributos do solo e dimensão fractal em ambientes naturais e transformados na região amazônica. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 9(2), pp. 231-243. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.002.0020>
- Gomes, L.C., Cardoso, I.M., Mendonça, E.S., Fernandes, R.B.A., Lopes, V.S. and Oliveira, T.S., 2016. Trees modify the dynamics of soil CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, pp. 30-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>
- Guimarães, G.P., Mendonça, E.S., Passos, R.R., Andrade, F.V. and Machado, R.V., 2013. Avaliação da qualidade do solo e de cafeeiros em propriedade familiar do Território do Caparaó-ES. *Revista Brasileira de*

- Agroecologia*, 8(3), pp. 236-246. URL: <http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/13347>
- Gupta, G.S., 2019. Land degradation and challenges of food security. *Review of European Studies*, 11(1), pp. 63-72. <https://doi.org/10.5539/res.v11n1p63>
- Han, L., Sun, K., Jin, J. and Xing, B., 2016. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. *Soil Biology and Biochemistry*, 94(1), pp. 107-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.023>
- Hendges, A.R.A.A., Melo, J.W.S., Guimarães, M.A. and Rabelo, J.S., 2018. Intercropping Kale with Culinary Herbs Alters Arthropod Diversity and Hinders Population Growth in Aphids. *Hortscience*, 53, pp. 44-48. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12010-17>
- Hurni, K., Zeleke, G., Kassie, M., Tegegne, B., Kassawmar, T., Teferi, E., Moges, A., Tadesse, D., Ahmed, M., Degu, Y., Kebebew, Z., Hodel, E., Amdihun, A., Mekuriaw, A., Debele, B., Deichert, G. and Hurni, H., 2015. Soil Degradation and Sustainable Land Management in the Rainfed Agricultural Areas of Ethiopia: An Assessment of the Economic Implications. *Report for the economics of land degradation initiative*, 62. URL: [https://d1bf23g64f8xve.cloudfront.net/sites/default/files/downloads/best-practices/ELD\\_Ethiopia\\_2015\\_web.pdf](https://d1bf23g64f8xve.cloudfront.net/sites/default/files/downloads/best-practices/ELD_Ethiopia_2015_web.pdf)
- Karp, D.S., Echeverri, A., Zook, J., Juárez, P., Ke, A., Krishnan, J., Chan, K.M.A. and Frishkoff, L.O., 2019. Remnant forest in Costa Rican working landscapes fosters bird communities that are indistinguishable from protected areas. *Journal of Applied Ecology*, 56, pp. 1839-1849. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13419>
- Klug, I., Mafra, A.L., Friederichs, A., Rech, C. and Fert Neto, J., 2020. Atributos químicos do solo em plantios florestais em substituição à vegetação nativa em campos de altitude. *Ciência Florestal*, 30(2), pp. 279-290. <https://doi.org/10.5902/1980509818905>
- Kremen, C. and Merenlender, A.M., 2018. Landscapes that work for biodiversity and people. *Science*, 362. <https://doi.org/10.1126/science.aau6020>
- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I. and Rillig, M.C., 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, pp. 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Li, J., Zhou, L.J. and Lin, W.F., 2018. Competitive characteristics related to nitrogen utilization and calla lily growth in rubber-calla lily intercropping systems. *Industrial Crops and Products*, 125, pp. 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.032>
- Li, S., Wang, B., Zhang, X., Wang, H., Yi, Y., Huang, X., Gao, X., Zhu, P. and Han, W., 2023. Soil particle aggregation and aggregate stability associated with ion specificity and organic matter content. *Geoderma*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116285>
- Liu, S.R., Yang, Y. and Wang, H., 2018. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1). <https://doi.org/10.5846/stxb201712072201>
- Mancuso, M.A.C., Peres, R. and Perdoná, M.J., 2013. Produção de café sombreado. *Colloquium Agrariae*, 9(1), pp. 31-44. URL: <https://revistas.unoeste.br/index.php/ca/article/view/592/979>
- Melloni, R., Costa, N.R., Melloni, E.G.P., Lemes, M.C.S., Alvarenga, M.I.N. and Nunes Neto, J., 2018. Sistemas agroflorestais cafeeiro-arauária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. *Ciência Florestal*, 28(2), pp. 784-795. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832392>
- Momesso, L., Crusciol, C.A.C., Leite, M.F.A., Bossolani, J.W. and Kuramae, E.E., 2022. Forage Grasses Steer Soil Nitrogen Processes, Microbial Populations, and Microbiome Composition in A Long-term Tropical Agriculture System. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107688%20Get%20rights%20and%20content>
- Mortimer, R., Saj, S. and David, C., 2018. Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agroforestry Systems*,

- 96(6), pp.1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0113-6>
- Nguyen, M.P., Vaast, P., Pagella, T. and Sinclair, F., 2020. Local Knowledge about Ecosystem Services Provided by Trees in Coffee Agroforestry Practices in Northwest Vietnam. *Land*, 9, pp. 486. <https://doi.org/10.3390/land9120486>
- Ohse, S., Rezende, B.L.A., Silveira, L. S. and Cortez, M. G., 2012. Viabilidade agrônômica de consórcios de brócolis e alface estabelecidos em diferentes épocas. *Idesia*, 30(2), pp. 29-37. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292012000200004>
- Oliveira, A.N., Oliveira, A.N., Silva, K.R., Silva, L.J.A. and Mello, A.H., 2017. Atributos químicos de solo sob diferentes sistemas de uso e manejo no projeto de assentamento Veneza - São Domingos do Araguaia, PA. *Revista Agrossistemas*, 9(1), pp. 170-179. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v9i1.4781>
- Padovan, M.P., Nascimento, J.S., Cariaga, J.A., Pereira, Z.V. and Agostinho, P.R., 2017. Serviços ambientais prestados por sistemas agroflorestais biodiversos na recuperação de áreas degradadas e algumas possibilidades de compensações aos agricultores. *Simpósio Nacional Recuperação de Áreas Degradadas*, 9, pp. 252-266. URL: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1078389/1/SINADP.252.pdf>
- Pavan, B.S., Melloni, R., Alvarenga, M.I.N. and Ferreira, G.M.R., 2018. Sistema agroflorestal cafeeiro-abacateiro e seus efeitos na qualidade do solo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(5), pp. 1917-1925. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.5.p1917-1925>
- Pavlidis, G., Tsihrintzis, V.A., Karasali, H. and Alexakis, D., 2018. Tree uptake of excess nutrients and herbicides in a maize-olive tree cultivation system. *Journal of Environmental Science and Health*, 53, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1366241>
- Payton, M.E., Miller, A.E. and Raun, W.R., 2000. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31(5-6), pp. 547-551. <https://doi.org/10.1080/00103620009370458>
- Pimentel, F. and Garcia, C.R., 2002. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. São Paulo, Brasil: FEALQ.
- Prezotti, L.C., Gomes, J.A., Dadalto, G.G. and Oliveira, J.A., 2007. Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo. 5ª aproximação. Vitória, Brasil: SEEA/INCAPER/CEDAGRO.
- Prezotti, L.C. and Guarçoni, A., 2013. Guia de interpretação de solo e foliar. Vitória, ES, Brasil: Incaper.
- Raj, A.D., Kumar, S. and Sooryamol, K.R., 2022. Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shiwalik Himalayas. *Catena*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.10627>
- Reis, P.R. and Cunha, R. L., 2010. Café Arábica do plantio à colheita. Lavras, Brasil: EPAMIG.
- Rodrigo-Comino, J., Keesstra, S. and Cerdà, A., 2018. Soil erosion as an environmental concern in vineyards: the case study of Celler del Roure, Eastern Spain, by means of rainfall simulation experiments. *Beverages*, 4(2). <http://hdl.handle.net/10550/65731>
- Silva, K.R., Amaral, E.T.O.P., Oliveira, A.N., Mello, A.H. and Oliveira, G.F., 2017. Indicadores químicos do solo sob diferentes usos e manejo no lote 31 do projeto de assentamento Veneza no sudeste do Pará. *Revista Agrossistemas*, 9(1), pp. 227-235. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v9i1.4778>
- Souza, G.S., Alves, D.I., Dan, M.L., Lima, J.S.S., Fonseca, A.L.C.C., Araújo, J.B.S. and Guimarães, L.A.O.P., 2017. Soil physico-hydraulic properties under organic conilon coffee intercropped with tree and fruit species. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52 (7), pp. 539-547. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000700008>
- Stefanoski, D.C., Santos, G.G., Marchão, R.L., Petter, F.A. and Pacheco, L.P., 2013. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), pp. 1301-1309. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>

- Urbano, C.N., Simonete, M.A., Ernani, P.R., Chaves, D.M. and Moro, L., 2018. Aporte de serapilheira e nutrientes ao solo em povoamentos jovens de Eucalyptus no planalto catarinense. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal*, 6(2), pp. 33-44. <http://dx.doi.org/10.5902/2316980X27068>
- Vallejo, V.E., Afanador, L.N., Hernández, M.A. and Parra, C.A., 2018. Efecto de la implementación de diferentes sistemas agrícolas sobre la calidad del suelo en el municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia. *Bioagro*, 30(1), pp. 27-38. URL: <http://ve.scielo.org/pdf/ba/v30n1/art03.pdf>
- Voltolini, L.C., Mercadante, M.E.G., Ramos-Filho, L.O., Moriconi, W. and Queiroga, J.L., 2018. Water use in Agroforestry System: A Brief Review of the Literature. *Cadernos de Agroecologia*, 13(2), pp. 1-10. URL: <http://cadernos.abaagroecologia.org.br/index.php/cadernos/article/view/2374>
- Waldron, A., Garrity, D., Malhi, Y., Girardin, C., Miller, D.C. and Seddon, N., 2017. Agroforestry can enhance food security while meeting other sustainable development goals. *Tropical Conservation Science*, 10, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1177/194008291772066>
- Wolz, K.J., Branham, B.E. and Delucia, E.H., 2018. Reduced nitrogen losses after conversion of row crop agriculture to alley cropping with mixed fruit and nut trees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, pp. 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.024>
- Yu, Z., Zheng, Y., Zhang, J. Zhang, C., Ma, D, Chen, L. and Cai, T., 2020. Importance of soil interparticle forces and organic matter for aggregate stability in a temperate soil and a subtropical soil. *Geoderma*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114088>
- Zhu, X.A., Liu, W.J., Jiang, X.J., Wang, P.Y. and Li, W.X., 2018. Effects of land-use changes on runoff and sediment yield: Implications for soil conservation and forest management in Xishuangbanna, Southwest China. *Land Degradation & Development*, 29(9), pp. 2962-2974. <https://doi.org/10.1002/ldr.3068>
- Zuñiga, F., Dec, D., Valle. S.R., Dorner, J. and MacDonald, R., 2014. Estabilidad estructural de un Andisol (Typic Durudand) bajo bosque nativo y pradera en el Sur de Chile. *Agro Sur* 42(3), pp. 55-66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n3-06>