



Tomo 03

Ciencias Naturales

Paper	Título	Autores	Primer Autor	Página
MTR052	Producción de un Candidato a Material de Referencia en Arcilla de Litio	Mariana Amezcua Vergara Dra. Rosalba Hernández Leos Dr. Adrián Sosa Domínguez M. en C. María del Rocío Arvizu Torres I.Q. Francisco Segoviano Regalado Q. en A. Pedro Ramírez Cruz Dra. Maricela González Leal	Amezcua Vergara	3.1
MTR085	Propiedades Edáficas en Paisajes Asociados a un Programa de Compensación Forestal	Karina Paola Martínez Pérez Rodian Fonseca Alejandro Vargas Cortez Karina Catellanos Romero	Martínez Pérez	3.6

Producción de un Candidato a Material de Referencia en Arcilla de Litio

Mariana Amezcua Vergara¹,
Dra. Rosalba Hernández Leos², Dr. Adrián Sosa Domínguez³ M. en C. María del Rocío Arvizu Torres⁴,
I.Q. Francisco Segoviano Regalado⁵, Q. en A. Pedro Ramírez Cruz⁶, Dra. Maricela González Leal⁷

Resumen—Este trabajo busca producir un nuevo material de referencia en arcilla de litio, ya que actualmente no existen materiales certificados de este tipo a nivel nacional e internacional. El objetivo es permitir mediciones confiables y trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), lo que facilitaría mapeos y estimaciones de reservas de litio en México. La producción de estos materiales se realizará en colaboración con el Centro Nacional de Metrología (CENAM), lo que contribuirá a satisfacer las necesidades del país en términos de mediciones precisas de litio en arcilla.

Palabras clave—Material de referencia, Arcilla, Litio.

Introducción

El litio, un metal alcalino con número atómico 3 y símbolo Li, es abundante en minerales como el espodumeno, la petalita y la eucritita. Descubierta en 1817 por Johan August Arfwedson, es altamente reactivo y se oxida fácilmente en aire o agua. Posee propiedades únicas, como alta conductividad térmica y bajo calor específico. Su versatilidad lo hace vital en tecnologías como baterías recargables y aleaciones aeroespaciales (Carpio et al., 2021).

El litio se encuentra mayormente en tres tipos de depósitos: pegmatitas, salmueras y rocas sedimentarias. Las pegmatitas, como las de espodumeno y petalita, constituyen el 26 % de las reservas y se localizan principalmente en EE. UU., RDC y Canadá (González y Cantallops, 2020). Las salmueras, presentes en salares continentales, geotérmicos y petroleros, representan el 66 % de las reservas, concentrándose en Chile, Argentina y Bolivia (triángulo del Litio) (González y Cantallops, 2020). Por último, las rocas sedimentarias, como arcillas y toba volcánica, constituyen el 8 % de las reservas y se encuentran principalmente en EE. UU., México, Serbia (Jadar) y Perú (Falchani) (González y Cantallops, 2020).

Los dispositivos electrónicos, como teléfonos celulares y tablets, dependen en gran medida de las baterías de litio, que almacenan energía eléctrica utilizando una sal de litio como electrolito para una reacción electroquímica reversible (Bravo, 2019). Los minerales de litio tienen aplicaciones en la fabricación de vidrios, cerámicas y otros productos refractarios, mientras que los compuestos derivados se utilizan en la producción de grasas lubricantes y en diversas aplicaciones industriales (Diaz et al., 2009). Estos compuestos, como el carbonato de litio y el hidróxido de litio, se utilizan en la fabricación de productos como tubos de televisión, esmaltes cerámicos y grasas lubricantes multifuncionales. Además, otros compuestos de litio, como el bromuro de litio y el fluoruro de litio, tienen aplicaciones específicas en la industria química y metalúrgica (Diaz et al., 2009).

Debido a la presencia de arcillas de Li en México, a la necesidad de evaluar el contenido de Li en arcilla y a la falta de materiales de referencia certificados (MRC) en Li a nivel mundial, es necesario contar con este tipo de MRC en México, por lo que este proyecto del desarrollo de un MRC es de suma importancia.

Según las pautas de la normativa ISO sobre materiales de referencia, se destacan conceptos esenciales. Un Material de Referencia (MR) se describe como aquel que exhibe suficiente homogeneidad y estabilidad en una o más

¹ La estudiante Mariana Amezcua Vergara estudia en Ingeniería Química de Materiales, Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. mamezcua14@alumnos.uaq.mx

² La Dra. Rosalba Hernández Leos es Profesora Investigadora de la Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, México. rosalba.hernandez.leos@uaq.mx

³ El Dr. Adrián Sosa Domínguez es Profesor Investigador de la Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, México. adrian.sosa@uaq.mx

⁴ La M. en C. María del Rocío Arvizu Torres es Coordinador científico de la Dirección de Análisis Inorgánico del Centro Nacional de Metrología (CENAM), Querétaro. marvizu@cenam.mx

⁵ El I.Q. Francisco Segoviano Regalado es Coordinador Científico de la Dirección de Análisis Inorgánico del Centro Nacional de Metrología (CENAM), Querétaro, México fsegovia@cenam.mx

⁶ El Q. en A. Pedro Ramírez Cruz es Metrólogo C de la Dirección de Análisis Inorgánico del Centro Nacional de Metrología (CENAM), Querétaro, México peramire@cenam.mx

⁷ La Dra. Maricela González Leal es Profesora Investigadora de la Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, México magole@uaq.mx

propiedades específicas para su empleo en mediciones (ISO, 2009). Por otro lado, un Material de Referencia Certificado (MRC) se define como aquel que se caracteriza mediante un procedimiento de metrología válido para una o más propiedades especificadas. Este debe estar acompañado de un certificado que detalla el valor de dichas propiedades, su incertidumbre asociada y una declaración (ISO, 2016).

Existen diversas guías y normativas disponibles para la elaboración de materiales de referencia certificados. La norma ISO 17034:2016 establece los criterios principales para la competencia de los productores de estos materiales. Estos criterios incluyen la realización de análisis cualitativos para verificar el tipo o la identidad del material, así como procesos de maquinado, molienda, mezclado, tamizado y homogeneización, entre otros (ISO, 2016).

Metodología

Procedimiento

La metodología utilizada está basada a las normas ISO y a procedimientos internos del Centro Nacional de Metrología (CENAM)

Después de recibir dos lotes identificados por: SGM-B-7 y SGM-B-13 de la arcilla de litio, se procedió a limpiarla para eliminar materiales gruesos y orgánicos mediante el uso de mallas específicas. Las muestras que pasan a través de una malla más fina que la número 18 se pulverizaron. A la fracción de tamaño de partícula de las mallas 5, 10 y gruesos, se aplicó el proceso de trituración y molienda empleando una pulverizadora marca Bico. Mientras que los correspondientes a malla 18 se tamizaron empleando el juego de mallas que se pueden observar en el Cuadro 1.

Tamiz	Distribución intervalo de tamaño de partícula (μm)
60	$250 < x$
100	$150 < x \leq 250$
120	$125 < x \leq 150$
170	$90 < x \leq 125$
200	$75 < x \leq 90$
230	$63 < x \leq 75$
270	$53 < x \leq 63$
finos	$\text{Finos} < x \leq 53$

Cuadro 1. Intervalos de tamaño de partícula de acuerdo a su tamiz

Se seleccionaron los lotes de arcilla entre los tamices 120, 170 y 200, lo que quedó arriba de la malla 120 se re pulverizó manualmente empleando un mortero, para después pasar de nuevo por la tamizadora, para lograr una máxima recuperación de arcilla

Para asegurar la homogeneización de los lotes de material de referencia, se siguió el procedimiento interno del CENAM, el cual se modificó para obtener. Se utilizó un homogeneizador de material con motor durante dos horas para agitar constantemente en tres direcciones y distribuir uniformemente las partículas en el lote.

Luego, se empleó un dosificador automático y un muestreador giratorio para dividir la muestra en ocho frascos, que luego se subdividieron nuevamente y se mezclaron. Como se muestra en el Cuadro 2.

									Frasco al mezclar.
1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	1a1b1c1d1e1f1g1h	
8b	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b	2a2b2c2d2e2f2g2h	
7c	8c	1c	2c	3c	4c	5c	6c	3a3b3c3d3e3f3g3h	
6d	7d	8d	1d	2d	3d	4d	5d	4a4b4c4d4e4f4g4h	
5e	6e	7e	8e	1e	2e	3e	4e	5a5b5c5d5e5f5g5h	
4f	5f	6f	7f	8f	1f	2f	3f	6a6b6c6d6e6f6g6h	
3g	4g	5g	6g	7g	8g	1g	2g	7a7b7c7d7e7f7g7h	
2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	1h	8a8b8c8d8e8f8g8h	

Cuadro 2. Representación de la muestra en cada frasco al homogeneizar

Finalmente, los frascos limpios y etiquetados se colocaron en una cámara de atmósfera controlada con argón, se sellaron con una bolsa de tereftalato de polietileno aluminizada (Mylar R[®]), se utilizó un sello termoplástico y una pistola de aire caliente

Resultados

Para la preparación del lote del MRC de arcilla de Li, se comenzó a tamizar toda la arcilla recibida, para separar por tamaño de partícula la arcilla que se trituraría, y de igual forma así poder retirar la mayoría de basura, hierbas y/o raíces que esta tuviera como se muestra en el Cuadro 3.

		SGM-B-7	SGM-B-13	Suma	
No de malla	Diámetro de poro mm	masa de muestra, g	masa de muestra, g	masa de muestra, g	Intervalo de tamaño de partícula mm
Gruesos		3548.4	5458.5	9006.9	$4 < x$
5	4	759.8	1624.3	2384.1	$2 < x \leq 4$
10	2	618.6	1325.2	1943.8	$1 < x \leq 2$
18	1	1972.4	4357.9	6330.3	finos $x \leq 1$
Total		6899.2	12765.9	19665.1	

Cuadro 3. Resultados de recuperación en el tamizado inicial.

A la fracción de tamaño de partícula de las mallas 5, 10 y gruesos, se aplicó el proceso de trituración y molienda utilizando la pulverizadora y también mortero para pulverizado manual. Mientras que los correspondientes a malla 18 se tamizaron. Posteriormente se trituró y tamizó la fracción arriba de malla 120 para asegurar el mayor porcentaje de rendimiento.

En el Cuadro 4 se muestra el rendimiento en porcentaje y en peso recuperado en cada tamiz, después de realizar el proceso de pulverizado, tamizado y repulverizado, donde se observa un mayor porcentaje de rendimiento en los tamices de interés (120, 170 y 200).

No de malla	Intervalo de tamaño de partícula μm	SGM-B-7		SGM-B-13		Total, g	Rendimiento
		Masa de muestra, g	Rendimiento	Masa de muestra, g	Rendimiento		
Gruesos	$250 < x$	950.8	13.7%	1148.8	9.0%	2099.6	10.6%
60	$150 < x \leq 250$	450.7	6.5%	1397.1	10.9%	1847.8	9.4%
100	$125 < x \leq 150$	534.1	7.7%	487.8	3.8%	1021.9	5.2%
120	$90 < x \leq 125$	1889.2	27.3%	3435.1	26.8%	5324.3	27.0%
170	$75 < x \leq 90$	963.3	13.9%	2564.6	20.0%	3527.9	17.9%
200	$63 < x \leq 75$	442.3	6.4%	1364.1	10.6%	1806.4	9.2%
230	$53 < x \leq 63$	356.4	5.2%	510.1	4.0%	866.5	4.4%
270	finos $x \leq 53$	362.5	5.2%	524.5	4.1%	887	4.5%
Total		5949.3	86.0%	11432.1	89.3%	17381.4	88.1%
Perdidas		966.5	14.0%	1376.5	10.7%	2343.0	11.9%
Total seleccionado		3294.8	47.6%	7363.8	57.5%	10658.6	54.0%

Cuadro 4. Resultados de tamizado y recuperación de arcilla en cada malla.

Posteriormente el total de arcilla recuperado se llevó a homogeneización, primero empleando un homogeneizador en tres dimensiones por un lapso de dos horas y posteriormente empleando un homogeneizador con dosificador automático para empezar a separar en los frascos de vidrio ámbar, que se llevaron a la cámara de atmósfera controlada, se destaparon y se abrieron los frascos y se inyecta un flujo de argón a la cámara asegurándose que la cámara está completamente llena de argón (esto se realiza dejando abierta la llave de salida de la cámara por unos minutos, posteriormente se cierra), observando los manómetros en los cuales la presión es constante.

Se dejaron unos minutos los frascos expuestos al argón y se cerraron en orden de llenado ascendente. Una vez cerrados los frascos, se libera la presión de argón y se retiraron los frascos para inmediatamente colocar el sello termoplástico (Figura 1)



Figura 1. Lote del candidato a material de referencia certificado

Análisis

De los 19 kg de arcilla con materia orgánica se obtuvo un total de 10 658.6 g con un tamaño de partícula de $63 \mu\text{m} < x \leq 125 \mu\text{m}$, fracción de masa que será utilizado para el envasado del MRC.

La producción del material de referencia de arcilla de litio en polvo fue de 256 unidades, con un tamaño de partícula de aproximadamente (53 a 125) μm , con un contenido de arcilla de litio de 40 g en cada unidad, envasada en atmósfera de gas inerte (Ar), cerrada herméticamente y sellada con un sello termo encogible, empacada al vacío en doble bolsa, la primera de polietileno y la segunda de tereftalato de polietileno aluminizada, el lote fue irradiado con rayos gamma (^{60}Co) en un intervalo de (17.9 a 21.7) kGy para conservar su estabilidad.

Conclusiones

Durante el desarrollo del proyecto se recibió el lote de arcilla proveniente del estado de Jalisco proporcionada por el Servicio Geológico Mexicano, se obtuvo el tamaño adecuado de partículas según pruebas preliminares, con las cuales se realizaron las mediciones para conocer el contenido de Li. Se aseguró la distribución de tamaño de partícula,

la homogeneidad y la preservación adecuada de la arcilla siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 17034 y los resultados de las pruebas realizadas durante el desarrollo de la producción del MRC, en las condiciones adecuadas. Esta etapa es primordial en el desarrollo de un material de referencia, en el que se determinará el valor de su contenido de Li. Se produjo un candidato a material de referencia de arcilla de litio, cuyo uso está relacionado al plan estratégico del país en cuanto a la explotación y aplicación del Litio. Cabe mencionar que el proyecto es considerado como pionero por no existir MRC de este tipo.

Limitaciones

En esta parte es importante destacar que el contenido de humedad en la arcilla al momento de la trituration y molienda influye considerablemente. Adicional las impurezas orgánicas presentes requirieron de tiempo para ser eliminadas y evitar interferencia en los procesos posteriores.

Referencias

Bravo, V. "Algo sobre el litio" Departamento de Economía Energética, CONICET, Fundación Bariloche, enero de 2019.

Carpio Ronquillo, M., et al. "Prospección de litio en el sur del Perú" [- [Boletín B 73]. Boletín Serie B: Geología Económica, n° 73. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), marzo de 2021.

CENAM "Procesamiento de materiales de referencia de matriz natural", Dirección general de metrología de materiales, Centro Nacional de Metrología, No. 620-ACP-P.54, versión 2.1, 2005.

Díaz V., A., Carpio R., M., y Ramírez C., J. "Litio". Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, INGEMMET, abril de 2009.

González Eyzaguirre, S. A. y Cantallop Araya, J., "Oferta y demanda del litio hacia 2030," Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, agosto de 2020.

ISO 2009. ISO GUIDE 33 "Uses of certified reference materials" International Organization for Standardization, 2009.

ISO 2016. ISO GUIDE 17034:2016 "General requirements for the competence of reference material producers" International Organization for Standardization, 2016.

Agradecimientos

Agradecemos a: Dra. Melina Pérez Urquiza, Dra. Silvia L. Amaya Llano por su apoyo en el Convenio de Colaboración CENAM-UAQ, que gracias a este se desarrolló un MRC de Arcilla de Litio, tanto en las instalaciones de la Facultad de Química de la UAQ y en las del CENAM. También agradecemos a la I.Q. J. Velina Lara Manzano por su apoyo en este proyecto de necesidad Nacional.

Apéndice

1. ¿Qué es un material de referencia?
2. ¿Qué opciones de reducción de tamaño de partícula son convenientes?
3. ¿Qué tipo de almacenamiento es adecuado para la arcilla?
4. ¿Por qué es importante el empleo de argón en etapas finales de empaque?
5. ¿Con qué objeto se irradian este tipo de muestras?
6. ¿Qué importancia tiene el envasado?
7. ¿En qué influye la homogeneización de la arcilla?
8. ¿Por qué es conveniente tener un material de referencia de arcilla de litio?

Propiedades Edáficas en Paisajes Asociados a un Programa de Compensación Forestal

Martínez-Pérez K^{1,2}, Fonseca R³, Vargas Cortes Alejandro⁴, Castellanos Romero K^{2,3}.

Resumen— La conservación y restauración de ecosistemas forestales son vitales para el clima, la biodiversidad y la integridad del suelo. Los programas de compensación intentan mitigar el impacto, pero alteran el suelo, sus propiedades y las coberturas vegetales. Este estudio en el departamento del Cesar, Colombia, evaluó propiedades del suelo en diferentes paisajes asociados a un programa de compensación forestal. Los pastos mostraron temperaturas más altas que los bosques. Los cambios en el uso del suelo afectan negativamente al suelo y a los servicios ecosistémicos, destacando la necesidad de gestionar adecuadamente las actividades para conservar los ecosistemas forestales y garantizar la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave— propiedades edáficas, suelo, paisaje, compensación forestal.

Introducción

La conservación y restauración de los ecosistemas forestales son vitales para combatir el cambio climático y preservar la biodiversidad terrestre. Sin embargo, la deforestación y el cambio en el uso del suelo han causado una significativa degradación y pérdida de estos ecosistemas. Los programas de compensación forestal se implementan como estrategias para contrarrestar estos efectos negativos y promover la conservación y restauración de la cobertura vegetal (Hansen, 2013; Pretzsch et al., 2017; Lennox et al., 2018). En el Departamento de Cesar, Colombia, se ha establecido un programa de compensación forestal con el fin de restaurar y conservar los paisajes forestales degradados en la región, mejorando las condiciones del suelo en áreas afectadas por actividades humanas como la agricultura, la ganadería y la minería. Aunque estos programas pueden tener impactos positivos, también modifican elementos clave del paisaje, como el suelo y las coberturas vegetales, además que pueden tener limitaciones en la evaluación de su efectividad a nivel paisajístico (Corpocesar et al., 2019).

El suelo es un componente esencial en la restauración y conservación de los ecosistemas forestales, ya que alberga una amplia diversidad de microorganismos y desempeña funciones cruciales en los ciclos biogeoquímicos. Las propiedades edáficas, como la textura, estructura, pH, contenido de nutrientes y materia orgánica, son determinantes para la productividad y salud del suelo. Los microorganismos son fundamentales para los procesos biológicos a nivel del suelo, y la actividad enzimática es clave en estos procesos, siendo un indicador importante de la calidad ambiental del suelo (Bardgett et al., 2005; Hågvar et al., 2005; Kaur et al., 2009; De Sousa et al., 2015).

Investigaciones a nivel de paisajes son fundamentales para comprender los efectos integrales de los programas de compensación forestal en el suelo y los ecosistemas, estos estudios permiten una interpretación holística de los diferentes componentes del paisaje y son herramientas útiles para la formulación de políticas ambientales que protejan y conserven los ecosistemas forestales (Aguirre et al., 2017). La evaluación de las propiedades a escala paisajística puede proporcionar información crucial sobre la efectividad de los programas de compensación forestal y ayudar a mejorar las prácticas de conservación en Colombia y otras regiones.

Metodología

Área de estudio:

El área de estudio abarca los municipios de La Jagua de Ibirico y Becerril en el departamento del Cesar, Colombia, parte de la cuenca del río Tucuy. La región se caracteriza por una topografía que incluye planicies y montañas, con un clima bimodal que tiene dos períodos de lluvia y dos períodos secos. Las actividades humanas como la agricultura, la ganadería y la minería han tenido un impacto ambiental significativo en la zona, lo que representa una amenaza para

¹ Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico – Colombia.

² Laboratorio de Biotecnología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico – Colombia.

³ Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico – Colombia.

⁴ Grupo interdisciplinar de Ciencias Marinas y Ambientales, Universidad del Atlántico – Colombia.

Correspondencia:

Karina Martínez Pérez, Universidad del Atlántico–Colombia. Email: karinapaolamartinez@mail.uniatlantico.edu.co

Karina Castellanos Romero, Universidad del Atlántico–Colombia. Email:

karinacastellanos@mail.uniatlantico.edu.co

la vegetación y la vida silvestre (Callejas, 2011; Aguilera M, 2016). Para abordar estos problemas, varias empresas mineras de carbón han implementado programas de compensación forestal, El "Plan de Compensación por Sustracción de la Reserva Forestal de la Serranía de Los Motilones" en el sur de la Serranía del Perijá es un ejemplo de ello, este plan incluye el pago por aumentar áreas de bosque conservado y la implementación de acciones de restauración, como la creación de sistemas agroforestales (CORPOCESAR, 2019).

Diseño de muestreo:

El diseño de muestreo se realizó considerando dos paisajes distintos: uno donde se ha implementado el programa de compensación forestal y otro donde aún no se ha aplicado. Se seleccionaron cuatro ventanas de muestreo, dos en áreas con el programa implementado y dos en áreas sin implementar. Cada ventana se dividió en cuatro tipos de coberturas: sistemas agroforestales de café, bosques, pastos y zonas de regeneración o restauración.

Recolección de las muestras:

Se recolectaron muestras de suelo en parcelas de 100x100 metros, siguiendo un patrón de zigzag, con nueve puntos de muestreo por parcela. Cada muestra de suelo se tomó a una profundidad de 20 cm y se homogeneizó para obtener una muestra compuesta. Se tomaron un total 64 muestras para análisis fisicoquímicos (Mendoza and Espinoza, 2017a).

Cobertura Vegetal:

Se determinó el porcentaje de cobertura vegetal en cada ventana utilizando fotografías hemisféricas tomadas en tres puntos centrales de la parcela (Tichý, 2016). Este procedimiento se realizó antes de la puesta del sol para garantizar la precisión de las mediciones (Garrido Velarde et al., 2017).

Análisis Físicos:

El estudio comprendió la medición de varios parámetros del suelo en parcelas seleccionadas. Para evaluar la temperatura y humedad del suelo, se utilizaron tres puntos centrales en cada parcela, donde se empleó un termohigrómetro digital para obtener tres lecturas por parcela. La resistencia a la penetración del suelo se midió con un penetrómetro de pistón de 6 mm de diámetro en tres puntos centrales de cada parcela, asegurándose de limpiar la superficie antes de cada medición para evitar interferencias (Henríquez et al., 2011). La densidad aparente del suelo se determinó tomando muestras con un cilindro de volumen conocido, las cuales se pesaron en el campo para obtener el peso húmedo y luego se secaron en laboratorio para obtener el peso seco y calcular la densidad aparente (Flores-Delgado and Alcalá-Martínez, 2010).

La textura del suelo se determinó utilizando el método de Bouyoucos, calculando el porcentaje de arena, limo y arcilla en cada muestra mediante la medición de la densidad de la muestra sedimentada en agua con un hidrómetro previamente calibrado (Norambuena et al., 2002). Estos porcentajes se utilizaron para clasificar la textura del suelo. Finalmente, la conductividad eléctrica del suelo se determinó tamizando el suelo seco y pesando una muestra específica, a la cual se le añadió agua y se agitó antes de medir la conductividad con un medidor calibrado. Se realizó una medición de blanco simultánea para corregir la influencia del agua, el vidrio y el papel filtro en el resultado. El proceso de medición de la conductividad eléctrica requirió condiciones especiales, como un volumen suficiente de muestra filtrada, una temperatura constante de 20 °C durante la filtración y la medición, así como una agitación adecuada para mantener las partículas suspendidas. Además, se ajustó la temperatura a 25 °C para la medición final, siguiendo las normativas colombianas pertinentes (ICONTEC, 2008; Jara Domínguez et al., 2019).

Análisis Químicos:

Para medir el pH del suelo, se empleó una técnica que implicaba la preparación de una suspensión de 10 g de suelo seco en 20 mL de agua destilada, seguida de agitación y reposo antes de medir el pH con un electrodo calibrado (Osorio, 2012). La determinación de la materia orgánica se basó en la Norma Colombiana NTC 5403 Walkey & Black, utilizando métodos de oxidación seca. Esto incluyó el tamizado de muestras, la adición de HCl en exceso, la homogeneización y el secado de la muestra antes de la medición en el equipo correspondiente (ICONTEC, 2006).

El nitrógeno total se determinó utilizando el método Kjeldahl. Esto implicó la digestión de la muestra con ácido sulfúrico y catalizador, seguido de la destilación para convertir el NH_4^+ en NH_3^- . La solución de NH_3 se valoró con HCl para calcular la cantidad de nitrógeno presente en la muestra. La presencia de elementos como hierro, cobre, manganeso, zinc y Olsen disponible se determinó mediante la preparación de una solución de la muestra filtrada con una solución Olsen. Luego, se añadió solución de bisulfato y se dejó burbujear antes de completar el volumen y realizar la medición colorimétrica correspondiente (Almendro-Candel et al., 2006).

La determinación de los elementos Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Zinc (Zn), se realizó siguiendo el método Olsen disponible, para esto se pesaron 2,5 g de suelo y se agregaron 25 mL de solución Olsen (NaHCO_3 0,5 M y NaOH a aproximadamente 2 g por litro). Tras agitar y dejar reposar la mezcla, se filtró y se extrajeron 10 mL de la fase líquida, transfiriéndolos a una botella. Se añadieron 3,3 mL de solución de bisulfato y se completó el volumen a 20 mL con agua. Se tomaron 10 mL como blanco y 10 mL para la medición colorimétrica, utilizando un colorímetro tras agregar el reactivo colorimétrico según ICONTEC (2007). Este proceso aseguró una precisión en la determinación de los elementos en el suelo, siguiendo estándares establecidos. Los elementos Carbono Orgánico, Fosforo Disponible,

Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio, fueron determinados siguiendo los protocolos consignados en la tabla 1.

Tabla 1. Protocolos para la determinación de Carbono Orgánico, Fosforo Disponible, Azufre, Boro Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio.

ELEMENTO	UNIDAD	PROTOCOLO
Carbono orgánico	g/100g	GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.
Fosforo Disponible (P) Bray II	mg/kg	GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.
Azufre (S) Disponible	mg/kg	Protocolo Agrosavia: Fosfato Monobásico de Calcio.
Boro (B) Disponible	mg/kg	Protocolo Agrosavia: Fosfato Monobásico de Calcio
Calcio (Ca) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.
Sodio (Na) Disponible	cmol(+)/kg	Bases en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.

Análisis de datos:

En cuanto al análisis de datos, se utilizó el software R bajo la licencia pública general de GNU. Para las variables físicas y químicas, se realizaron análisis de componentes principales para entender la varianza y los patrones de agrupación.

Resultados

El análisis de componente principales permitió mirar cómo se comportan y relacionan las variables físicas y químicas en conjuntos, las primeras 3 dimensiones son suficientes para explicar la varianza de los datos. La figura 1A, muestra cómo se ordenan las variables químicas y se agrupan hacia la dimensión 1 con correlación (35,8 %), por lo tanto, es donde están las variables con mayor efecto sobre el comportamiento de los datos con valores negativos lo cual quiere decir que los sitios con esta agrupación presentan valores altos en esas variables, en comparación con las demás y los sitios con valores de las variables en la primera dimensión positivos tendrán mayor cantidad en variables como el hierro y la arcilla. Con respecto a la dimensión 2, esta explica el 16,9 % de la variabilidad total. Con valores negativos para las variables como resistencia a la penetración del suelo, temperatura y densidad aparente. La dimensión 3 presenta porcentaje de variación de 8.8 % (Figura 1B).

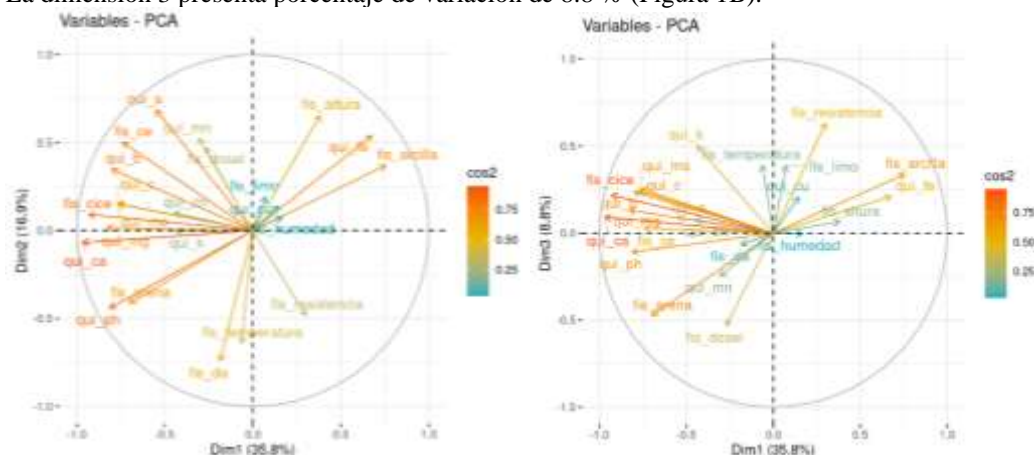


Figura 1. A: Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 1 y 2. B: Análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas del suelo en la dimensión 2 y 3.

Para explicar mejor lo narrado anteriormente, sobre el análisis de componentes principales, a continuación, se muestran gráficos con clústeres que permiten ver la agrupación de los sitios de muestreos con respecto a las coberturas. En el análisis de componentes principales para las variables fisicoquímicas por sitios con respecto a las coberturas (Figura 2), los pastos se agrupan en la dimensión 2 hacia al lado negativo, más asociados con valores elevados en las variables como temperatura, densidad aparente y resistencia a la penetración. Los bosques se encuentran agrupados en la parte positiva, relacionados con altos niveles de nutrientes, cobertura vegetal, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica alejados de la parte negativa que esta más relacionadas con variables característicamente

Gómez et al., 2022). En cuanto a la densidad aparente del suelo, se observa que los pastos y los sistemas agroforestales de café presentan los mayores valores en todas las ventanas, mientras que los bosques tienen los valores más bajos. La tala de bosques primarios y la presencia de tránsito de animales en los pastos contribuyen a una mayor densidad aparente del suelo (Martínez and Zinck., 2004; Salamanca and Sadeghian, 2005; Akiyoshi et al., 2022). Las propiedades físicas del suelo muestran variaciones significativas entre las ventanas de muestreo, especialmente en la resistencia a la penetración del suelo, la densidad aparente y el dosel. Sin embargo, las variaciones en las propiedades químicas del suelo son más evidentes entre las ventanas que entre las coberturas individuales. Las diferencias altitudinales entre las ventanas pueden influir en las propiedades físicas del suelo, como la resistencia a la penetración y la densidad aparente. Además, se observa una relación entre la temperatura del suelo y la temperatura atmosférica, con valores más bajos en las ventanas muestreadas durante la influencia de la temporada de huracanes del Atlántico (Globe 2005).

Los análisis revelaron correlaciones positivas y significativas entre variables como la materia orgánica y el carbono, así como entre elementos como calcio, boro y magnesio con la conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, pH y carbono orgánico. La materia orgánica influye en la capacidad de intercambio catiónico del suelo al proporcionar coloides, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes y el pH del suelo. Estas correlaciones son coherentes con la literatura científica previa (Martínez et al., 2008; Martínez-González et al., 2010; Contreras Santos et al., 2019). Por otro lado, se encontraron correlaciones negativas y fuertes entre la resistencia a la penetración del suelo y el dosel vegetal. La pérdida de cobertura vegetal afecta las propiedades hidráulicas del suelo, contribuyendo a la pérdida de agua, aumento de la temperatura y aumento de la resistencia a la penetración. Este hallazgo concuerda con estudios anteriores sobre cambios en las propiedades del suelo en gradientes de cobertura vegetal (Ellies et al., 1993; Guo et al., 2019; Lozano-Baez et al., 2021). Además, se observó una correlación negativa entre la cantidad de arcilla y arena, donde un menor porcentaje de arena se asoció con un mayor porcentaje de arcilla. Este resultado es consistente con la clasificación de suelos según el triángulo textural de USDA, que se basa en la relación inversa entre las proporciones de arcilla, arena y limo (Ciancaglini, 2000; González et al., 2021; Penn State Extension 2023).

Los resultados anteriormente expuestos, se explican con investigaciones que previamente han reportado que el uso y manejo de suelo modificando las coberturas vegetales afecta las propiedades físicas y químicas del suelo, y conlleva a la pérdida de diversidad y servicios ecosistémicos; los bosques usualmente tienen valores elevados en carbono y materia orgánica debido a la presencia de hojarasca y material vegetal que permite el secuestro de carbono y la incorporación de este a la biofase por parte de los microorganismos, la explotación del suelo de forma intensiva degradando sus coberturas hasta obtener pastizales sin dosel con suelo desnudo, disminuye el secuestro de carbono y aumenta los niveles de compactación, provocando la baja incorporación de nutrientes e infertilidad del suelo y produce un incremento en la resistencia a la penetración del suelo, la densidad aparente y la temperatura debido a la pérdida rápida de agua en el suelo y una mayor absorción de energía del sol por este (Martínez et al., 2008; Carvajal et al., 2009; Mendoza y Espinoza, 2017b; Agroecosistemas, 2020; Mojena, 2020).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a las coberturas que presentan mayores valores de temperatura y la humedad, se tiene que estas corresponden a los sistemas agroforestales de café y a los pastos, mientras que los de menores valores de estas variables, corresponden a bosques, siendo estas las que menor porcentaje de cobertura vegetal, lo que sugiere una relación negativa en estas variables.

Las mayores extensiones de cobertura vegetal están representadas por los bosques y las zonas de regeneración, mientras que los de menor porcentaje son los pastos, exceptuando algunos que se puede clasificar como pastos arbolados. La evidencia sugiere que los cambios en la vegetación son cruciales para el comportamiento de las variables físicas y químicas del suelo, así como las biológicas, los bosques demuestran ser coberturas más estables con respecto a sus propiedades físicas y químicas con patrones de relación entre las variables claramente establecidos, en contraste las regeneraciones, a pesar de tener cobertura vegetal representativa, no presenta patrones de relación de variables claros debido que estas coberturas han respondido a cambios en la vegetación que afectan las características de las propiedades físicas y químicas.

La resistencia a la penetración presenta mayores valores en las coberturas donde la temperatura era mayor y la humedad menor (Patos y sistemas agroforestales de café), igualmente, los tipos de coberturas que presentan mayor densidad aparente son los sistemas agroforestales de café y los pastos; lo que posiblemente esté relacionado con una mayor compactación del suelo, resultados coherentes con la evidencia que soporta que los cambios en el uso del suelo

y la pérdida de las coberturas vegetales afecta directamente la cantidad de carbono y materia orgánica de este, impidiendo el secuestro de carbono y esto condiciona la estructura física del suelo relacionada con la capacidad de este para retener agua y minerales. Sin embargo, esto no impide el establecimiento de comunidades microbianas con densidades celulares altas que responden a las condiciones particulares de cada cobertura. Los bosques, zonas de regeneración y sistemas agroforestales de café son coberturas asociadas con valores altos en las variables relacionadas con calidad del suelo, como materia orgánica, carbono orgánico y nutrientes. Los pastos son coberturas asociadas con variables que indican grado de compactación como densidad aparente, resistencia a la penetración y temperatura.

Limitaciones

En futuros estudios es importante tener en cuenta limitaciones de tiempo que permita procesar un mayor número de muestras para obtener más información ya sea ampliando las áreas muestreadas para así obtener más información, así mismo también es necesario considerar mayor disponibilidad de recursos que faciliten la recolección de información en campo y permitan adquirir equipos para obtener resultados que puedan ampliar los análisis.

Recomendaciones

Se recomienda dar continuidad a la evaluación de las variables, para observar otro tipo de variabilidad en los datos, por ejemplo: variabilidad espacial y temporal. Las diferencias en altitud de una de las ventanas de muestreo y el análisis de la información abren la ventana para considerar en futuros estudios la posición del paisaje como un factor que influye en las variables fisicoquímicas del suelo.

A partir de los resultados obtenidos se muestra interesante evaluar en el área de estudio, la incidencia detallada de las actividades que se realizan en no compensación tales como quema, tala y uso de fertilizantes inorgánicos. Para futuros estudios se recomienda tener en cuenta la variabilidad intrínseca dentro de un mismo tipo de cobertura, ya que esta explica los patrones heterogéneos observados en los resultados.

References

- Almendro-Candel, M.B., Navarro-Pedreño, J., Meléndez-Pastor, I., Córdoba Sola, P., Gómez-Lucas, I., 2006. Materia orgánica y movilidad de nitrógeno y potasio en un Antrosol del sureste español (Alicante) enmendado con lodo de depuradora. *Edafología* 13, 151–160.
- Agroecosistemas, T.E.S., 2020. Efecto del manejo agrícola 389–398.
- Aguilera, 2016. Serranía del Perijá: Geografía, capital humano, economía y medio ambiente i María Aguilera Díaz ii. Ser. Doc. Trab. Sobre Econ. Reg. del Banco la República 134.
- Aguirre, M.A., López Ibarra, L.I., Bolaños Trochez, F.V., González Guevara, D.F., 2017. Percepción del paisaje, agua y ecosistemas en la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *Perspect. Geográfica* 22, 109–126. <https://doi.org/10.19053/01233769.5402>
- Akiyoshi, L.E.S., Reinert, D.J., Secco, D., Fenner, P.T., Reichert, J.M., 2022. Soil Structure under Forest and Pasture Land-Uses Affecting Compressive Behavior and Air Permeability in a Subtropical Soil. *Soil Syst.* 6. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040098>
- Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2005). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2(8), 805-814
- Callejas, R., 2011. Generalidades del departamento del cesar. Corp. Auton. del cesar. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Carvajal, A.F., Feijoo, A., Quintero, H., Rondón, M.A., 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Rev. la Cienc. del Suelo y Nutr. Veg.* 9, 222–235. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912009000300005>
- Carvajal, A.F., Pabón, J.D., 2014. Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la Región Andina Colombiana. *Soc. Nat.* 26, 95–112. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140107>
- Ciancaglini, N., 2000. Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. INTA EEA San Juan 10.
- Contreras Santos, J.L., Martínez Atencia, J., Cadena Torres, J., Fallas Guzmán, C.K., 2019. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agron. Costarric.* 44, 29–41. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Corpocesar, C., Departamento, G.D.E.L., Cesar, D.E., 2019. Generalidades del departamento de cesar 9–10.
- De Sousa, R.F., Brasil, E.P.F., De Figueiredo, C.C., Leandro, W.M., 2015. Soil microbial biomass and activity in wetlands located in preserved and disturbed environments in the Cerrado biome | Biomassa e atividade microbiana do solo em veredas situadas em ambientes conservados e antropizados no bioma Cerrado. *Biosci. J.* 31, 1049–1061.
- Ellies, A., Ramirez, C., Mac Donald, R., 1993. Variacion en la resistencia del suelo por su uso. *Turrialba* 43, 77–82.
- Fang, X., Zhao, W., Wang, L., Feng, Q., Ding, J., Liu, Y., Zhang, X., 2016. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3309–3323. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3309-2016>
- Findell, K.L., Berg, A., Gentine, P., Krasting, J.P., Lintner, B.R., Malyshev, S., Santanello, J.A., Shevliakova, E., 2017. The impact of anthropogenic land use and land cover change on regional climate extremes. *Nat. Commun.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01038-w>
- Flores-Delgado, L., Alcalá-Martínez, J.R., 2010. Manual de Procedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos. *Inst. Geol.* 56.
- Garrido Velarde, J.G., Hernández Blanco, J.H., Montero Parejo, M.J., 2017. Estudio de la cobertura del dosel del castaño. *Rev. científica Monfragüe Resiliente* 1, 114–130.
- González, A., Rodríguez, G., Fábrega Duque, J., 2021. Impacto de la cobertura boscosa y uso de suelo sobre la textura y conductividad hidráulica del suelo en la subcuenca del río Estibaná. *Congr. Nac. Cienc. y Tecnol. – APANAC* 257–262. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3194>
- Guo, N., Degen, A.A., Deng, B., Shi, F., Bai, Y., Zhang, T., Long, R., Shang, Z., 2019. Changes in vegetation parameters and soil nutrients along degradation and recovery successions on alpine grasslands of the Tibetan plateau. *Agric. Ecosyst. Environ.* 284, 106593. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106593>
- Hansen, M.C., 2013. High-Resolution Global Maps of 850, 850–854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hågvær, S., Dyrkolbotn, S., & Steinnes, E. (2005). Relationships between soil chemistry, vegetation and ecosystem processes at three oligotrophic

catchments in Norway. *Ecological Bulletins*, 53, 207-216.

- Henríquez, C., Ortiz, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., Villalobos, P., Gómez, D., 2011. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, AL CORTE TANGENCIAL, DENSIDAD APARENTE Y TEMPERATURA EN UN SUELO CAFETALERO, JUAN VIÑAS, COSTA RICA 35, 175–184.
- ICONTEC, 2006. NTC 5403.
- ICONTEC, 2007. NTC 5526.
- ICONTEC, 2008. NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 5596. CALIDAD DE SUELO, DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.
- Lennox, G.D., Gardner, T.A., Thomson, J.R., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A.C., Mac Nally, R., Aragão, L.E.O.C., Ferraz, S.F.B., Louzada, J., Moura, N.G., Oliveira, V.H.F., Pardini, R., Solar, R.R.C., Vaz-de Mello, F.Z., Vieira, I.C.G., Barlow, J., 2018. Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 24, 5680–5694. <https://doi.org/10.1111/gcb.14443>
- Jara Domínguez, C.E., Luis David, M.D., Alvarez, Toro, P., Carlos Eduardo, N.R., 2019. ESTABLECIMIENTO DE ENSAYOS PARA MODELACIÓN DE FRIJOL EN EL, TeSAC Cauca, Colombia
- Kaur, R., Jhorar, O. P., Malik, R. S., & Singh, J. (2009). Distribution and retention of heavy metals in the soil of effluent irrigated agriculture land. *Journal of Environmental Biology*, 30(1), 61-66.
- Lozano-Baez, S.E., Cooper, M., Ferraz, S.F. de B., Rodrigues, R.R., Castellini, M., Di Prima, S., 2019. Recovery of soil hydraulic properties for assisted passive and active restoration: Assessing historical land use and forest structure. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11010086>
- Lozano-Baez, S.E., Domínguez-Haydar, Y., Di Prima, S., Cooper, M., Castellini, M., 2021. Shade-grown coffee in colombia benefits soil hydraulic conductivity. *Sustain.* 13, 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13147768>
- Martínez, L.J., Zinck, J.A., 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil Tillage Res.* 75, 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2002.12.001>
- Martínez, H., Juan Pablo Fuentes, E., Edmundo Acevedo, H., 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Rev. la Cienc. del Suelo y Nutr. Veg.* 8, 68–96. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912008000100006>
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., Ortiz-Medel, J., 2010. Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnol. y Ciencias del Agua* 1, 89–103.
- Mendoza, R., Espinoza, A., 2017. Guía Técnica para muestreo de suelos. Asa 13–21.
- Menezes, R.S.C., Sales, A.T., Primo, D.C., Albuquerque, E.R.G.M. de, Jesus, K.N. de, Pareyn, F.G.C., Santana, M. da S., Santos, U.J. dos, Martins, J.C.R., Althoff, T.D., Nascimento, D.M. do, Gouveia, R.F., Fernandes, M.M., Loureiro, D.C., Araújo Filho, J.C. de, Giongo, V., Duda, G.P., Alves, B.J.R., Ivo, W.M.P. de M., Andrade, E.M. de, Pinto, A. de S., Sampaio, E.V. de S.B., 2021. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma* 390. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>
- Mojena, E.E., 2020. Pensamiento 2019–2020.
- Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Ng, C.W.W., Garg, A., 2019. Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling. *J. Hydrol.* 571, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.009>
- Norambuena, P. V., Walter, L.L., Vera, W.L., 2002. Comparison between the pipette and bouyoucos methods and their relation with water retention in eight soils of the andean plateau , Parinacota Province , Chile. *Agric. Téc.* 62, 150–157.
- Osorio, N.W., 2012. pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. *Manejo Integr. del Suelo y Nutr. Veg.* 1, 4–7.
- Pretzsch, H., Forrester, D.I., Bauhus, J., 2017. Mixed-species forests: Ecology and management, *Mixed-Species Forests: Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>
- Reiners, W.A., Bouwman, A.F., Y, P.W.F.J., Keller, M., 2014. Tropical Rain Forest Conversion to Pasture : Changes in Vegetation and Soil Properties Author (s): W . A . Reiners , A . F . Bouwman , W . F . J . Parsons and M . Keller Published by : Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stab>. *Ecol. Soc. Am.* 4, 363–377.
- Salamanca, J.A., Sadeghian, S., 2005. LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA. *CENICAFÉ* 56. <https://doi.org/10.23840/agehrd.2009.41.1.191>
- Song, Y.T., Zhou, D.W., Zhang, H.X., Li, G. Di, Jin, Y.H., Li, Q., 2013. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. *Chinese Sci. Bull.* 58, 907–912. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5596-y>
- Tichý, L., 2016. Field test of canopy cover estimation by hemispherical photographs taken with a smartphone. *J. Veg. Sci.* 27, 427–435. <https://doi.org/10.1111/jvs.12350>
- Villazón Gómez, J.A., Martín Gutiérrez, G., Cobo Vidal, Y., Candelario, R., Tablada, N., Alejandro, R., Reyes, G., 2022. Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un haplustert crómico bajo pasto natural Spatial variability of soil resistance to penetration on a chromic haplustert under natural grassland. *Idesia* 40, 7–14.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H., De Moraes, J.M., 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *For. Ecol. Manage.* 222, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>