



[Correlación entre las propiedades físicas y químicas de un oxisol con la conductividad eléctrica aparente] †

[Correlation between the physical and chemical properties of an oxisol and the apparent electrical conductivity]

Sareth Samantha Ulloa-Galeano¹, Jhon Alexander Carrillo-Rozo²
and Sergio David Parra-González^{3*}

¹Universidad de los Llanos, Km 12 vía Puerto López, Zip Code 1745, Villavicencio Meta, Colombia. E-mail: ssulloa@unillanos.edu.co

²Grupo de Investigación Producción, Tropical Sostenible (PTS), Universidad de los Llanos, Km 12 vía Puerto López, Zip Code 1745, Villavicencio Meta, Colombia. E-mail: jhon.carrillo@unillanos.edu.co

³Grupo de Investigación Agro-tecnologías, Sostenibilidad y Sistemas Forestales (DIGITAL-FAS) Universidad de los Llanos, Km 12 vía Puerto López, Zip Code 1745, Villavicencio Meta, Colombia. E-mail: sdparra@unillanos.edu.co

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Geophysical methods such as the determination of apparent electrical conductivity (Cea) with portable equipment such as the EM38-MK2 electromagnetometer, allow pedometric studies and soil segmentation to be carried out. Despite the potential of this technology, there is a lack of research in the Oxisols of the Colombian plateau that correlates it with routinely determined physical and chemical properties, which are of interest at various fields of knowledge. **Objective:** To correlate the apparent electrical conductivity of the soil measured with the EM38-MK2 electromagnetometer with the physical and chemical properties of an Oxisol from the Colombian plateau. **Methodology:** The research was conducted in three 9,000 m² plots in which apparent electrical conductivity was measured and correlated with physical and chemical properties at a depth of 0–20 centimeters. Results: The Cea presented a high and significant correlation with the content of sand, silt, clay, organic carbon, manganese, field capacity and permanent wilting point, and a high index of spatial dependence. **Implications:** The research is the starting point for building predictive models of the Cea with soil variables for the region. **Conclusion:** The Cea determined with the EM38-MK2 had the sensitivity to be used at plot scale in soils with a high degree of evolution. Under the edaphoclimatic conditions of the study area, the information collected with this equipment can be correlated with variables of interest for the sustainable use and management of soils.

Key words: characterization; electromagnetic emission; geophysics; pedometry; spatial dependence.

RESUMEN

Antecedentes: Los métodos geofísicos como la determinación de la conductividad eléctrica aparente (Cea) con equipos portátiles como el electromagnetómetro EM38-MK2, permiten realizar estudios pedométricos y la segmentación de suelos. A pesar del potencial de esta tecnología, en los Oxisoles de la altillanura colombiana hay deficiencia de investigaciones que la correlacionen con las propiedades físicas y químicas determinadas rutinariamente, y de interés en diferentes áreas del conocimiento. **Objetivos:** Correlacionar la conductividad eléctrica aparente del suelo medida con el electromagnetómetro EM38-MK2 con las propiedades físicas y químicas de un Oxisol de la altillanura de Colombia. **Metodología:** La investigación se realizó en tres parcelas de 9000 m² en las que se midió la conductividad eléctrica aparente y se correlacionó con propiedades físicas y químicas a una profundidad de 0-20 centímetros. **Resultados:** La Cea presentó una correlación alta y significativa con el contenido de arena, limo, arcilla, carbono orgánico, manganeso, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y un alto índice de dependencia espacial. **Implicaciones:** La investigación es el punto de partida en la construcción de modelos predictivos de la Cea con variables del suelo para la región. **Conclusión:** La Cea determinada con el equipo EM38-MK2 tiene la sensibilidad para ser usado a escala de lote en suelos de alto grado de evolución, bajo las

† Submitted March 29, 2025 – Accepted July 13, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6268>



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

ISSN: 1870-0462.

ORCID = S.S. Ulloa-Galeano: <http://orcid.org/0009-0008-9870-2479>; J.A. Carrillo-Rozo: <http://orcid.org/0009-0008-1907-732X>; S.D. Parra-González: <http://orcid.org/0009-0008-1907-732X>

condiciones edafoclimáticas de la zona de estudio la información recolectada con este equipo se puede correlacionar con variables de interés para el uso y manejo sostenible de los suelos.

Palabras clave: caracterización; emisión electromagnética; geofísica; pedometría; dependencia espacial.

INTRODUCCIÓN

La conductividad eléctrica aparente (Cea) es la capacidad del suelo para conducir la corriente eléctrica, se mide en campo con equipos como el electromagnetómetro EM38-MK2 (Geonics Limited Ontario, 2002; Pentoś *et al.*, 2021). Este parámetro se puede correlacionar con las propiedades y condiciones del suelo que influyen la provisión de diversos servicios ecosistémicos, entre ellos la producción de fibras y alimentos (Petsetidi y Kargas, 2023). En este contexto, la cartografía digital de suelos estudia y modela la distribución de las características y propiedades del medio edáfico, haciendo uso de diferentes tecnologías, metodologías y modelos conceptuales (Estrada-Godoy *et al.*, 2023). El conocimiento de las propiedades del suelo a diferentes escalas (espaciales y temporales) permite una gestión eficiente del recurso en el ámbito de la conservación del medio ambiente y en el manejo de los sistemas de producción agrícola (Ehosioke *et al.*, 2024). Además, los métodos geofísicos de superficie cercana como la inducción electromagnética (IE) permiten la exploración del suelo y subsuelo a diferentes profundidades, siendo la base para el desarrollo de productos de cartografía digital en una, dos o tres dimensiones a diferentes resoluciones temporales (Loiseau *et al.*, 2023; Van-Leeuwen *et al.*, 2024).

La geofísica aplicada al estudio de los ecosistemas y la agricultura usa equipos no invasivos, con la capacidad de realizar mediciones de cero a dos metros de profundidad (Lal, 2017; Loiseau *et al.*, 2023). Entre los métodos geofísicos más empleados en la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los suelos se encuentran: la resistividad, la inducción electromagnética (IE), la penetración con diferentes tipos de ondas y la reflectancia (Lal, 2017; Romero-Ruiz *et al.*, 2018). La IE mide la conductividad eléctrica aparente (Cea) que se usa como un indicador de las condiciones o las propiedades de los horizontes edáficos (Tsai y Lin, 2022; Van-Leeuwen *et al.*, 2024). La IE ha mostrado ser versátil, permitiendo realizar mediciones a bajo costo y con gran eficacia, siendo una ventaja frente a los métodos tradicionales de exploración y muestreo (Pathirana *et al.*, 2023). La Cea determinada con equipos de IE presentan correlación con las propiedades del suelo como: la textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de humedad, densidad aparente, capacidad de almacenamiento de agua, infiltración y salinidad, que son de interés en la caracterización, y el uso y

manejo del suelo (Doolittle y Brevik, 2014; Zajícová y Chuman, 2019; Henrion *et al.*, 2024).

El electromagnetómetro Geonics EM38-MK2 es un equipo de inducción electromagnética que es compacto de fácil transporte y manejo en el campo, tiene dos bobinas (una emisora y otra receptora) separadas a 0.5 y 1.0 m (Geonics Limited Ontario, 2002). Las bobinas pueden ser orientadas vertical u horizontalmente, lo que permite medir la Cea a diferentes profundidades 0.375, 0.75 y 1.5 m (Geonics Limited Ontario, 2002; Heil y Schmidhalter, 2015). Las mediciones obtenidas con este equipo han mostrado una alta relación con la textura del suelo, la densidad aparente, el contenido de humedad y la salinidad (Rodrigues *et al.*, 2020; Mello *et al.*, 2022; He *et al.*, 2023). Sin embargo, los estudios se han realizado principalmente en suelos que se encuentran en condiciones subtropicales y que presentan contenidos medios a altos de elementos químicos y sales (Ondrasek y Rengel, 2021). En contraste, en el departamento del Meta en Colombia, los suelos se caracterizan por tener arcillas de tipo 1:1 e hidróxidos de hierro y aluminio, bajo contenido de elementos como: fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio, que inciden en una baja fertilidad natural (IGAC, 2004; IGAC y CIAF, 2018). Las condiciones mencionadas pueden incrementar la resistencia del suelo a las ondas electromagnéticas emitidas por el equipo, afectando negativamente las mediciones de la Cea, que en consecuencia, pueden dificultar la correlación del parámetro con las propiedades físicas y químicas que son de interés en los estudios de carácter ambiental o agrícola (Geonics Limited Ontario, 2002; Sanches *et al.*, 2022). Por lo tanto, este trabajo se realizó con la finalidad de correlacionar la conductividad eléctrica aparente del suelo (Cea) medida con el electromagnetómetro EM38-MK2 con las propiedades físicas y químicas de un Oxisol de la altillanura de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó entre los meses de agosto del año 2023 y junio del año 2024, en tres predios ubicados en la vereda las Leonas del municipio de Puerto López, en el departamento del Meta, Colombia. Las coordenadas de los predios son: P1: (474765.89N; 790001.32O), P2: (473604.84N; 794732.02O), P3 (473782.00N; 794738.06O) (WGS-84 - UTM 18 N, EGPS: 32618). El clima de la zona es tropical lluvioso (Ami), con una temperatura media anual de 22.5 °C, la precipitación anual varía entre

2000 a 3000 mm, distribuida de forma monomodal, con inicio de la temporada de lluvias en el mes de abril y finalizando en el mes de diciembre (Bernal *et al.*, 2013). Los suelos de la zona en la que se desarrolló el estudio se encuentran en un paisaje de altillanura y se clasifican como Typic Hapludox (IGAC y CIAF, 2018).

Parcelas de evaluación, muestreo de suelos y variables evaluadas

Usando una estación total, en cada predio se trazó una parcela de 150 x 60 m (9000 m²), la cual fue subdividida en nueve subparcelas de 50 x 20 m (1000 m² cada una). En cada subparcela se realizó un muestreo de suelo compuesto usando un barreno de tipo Edelman. De cada subparcela se recolectaron tres muestras, cada una conformada por la combinación de siete submuestras extraídas a una profundidad de 0 a 20 cm, que corresponde a la zona de crecimiento activo de las raíces de las plantas. Durante y después del muestreo, el suelo colectado fue empacado en bolsas de cierre hermético y almacenadas a temperatura ambiente (ICONTEC, 2022a). En cada predio se realizaron tres campañas de muestreo, el intervalo entre cada campaña fue de 100 días, lo que permitió abarcar la variabilidad climática de la región de estudio. Las propiedades determinadas en el laboratorio fueron las siguientes: conductividad eléctrica (C.E.) (determinada en el extracto de saturación con un conductímetro) (ICONTEC, 2022b), Textura del suelo (% arena (A), % limo (L) y % arcilla (Ar) (Bouyoucos)) (ICONTEC, 2018b), acidez intercambiable (Al+H) (KCl 1N) (ICONTEC, 2017), carbono orgánico (C.O.) (Walkley y Black) (ICONTEC, 2022c), capacidad de intercambio catiónico (Acetato de Amonio pH 7) (ICONTEC, 2014), calcio intercambiable (Ca⁺²) (Acetato de amonio pH 7) (ICONTEC, 2016), manganeso (Mn⁺²) y boro (B) intercambiable (DTPA) (ICONTEC, 2007), nitrógeno (nitrato y amonio) (KCl 2N) (ICONTEC, 2008), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (equipo de Richards -0.33 y -15 Kp, respectivamente) (Rab *et al.*, 2011).

Medición de la conductividad eléctrica aparente (Cea)

En cada predio la Cea fue medida usando el electromagnetómetro Geonics EM38-MK2. Las mediciones se realizaron con el dipolo horizontal (H) y las bobinas de 0.5 y 1.0 m. La configuración seleccionada permitió obtener dos mediciones por parcela en cada una de las campañas de muestreo. La calibración del equipo se realizó de acuerdo a las recomendaciones indicadas en el manual del fabricante (Geonics Limited Ontario, 2002).

Análisis geoestadístico de la Cea

Las mediciones realizadas en campo con el electromagnetómetro EM38-MK2 se descargaron en un archivo en formato (CSV), el cual contenía los valores de la Cea y las coordenadas de cada punto medido en el sistema de coordenadas WGS-84 - UTM 18 N (EGPS: 32618). Posteriormente, se eliminaron los datos atípicos usando el método del rango intercuartílico; y después se creó una nueva base de datos en formato (CSV). Este procesamiento se realizó en el entorno R (versión 4.1.0.). Partiendo del archivo con los datos depurados se creó una capa de puntos (shapefile) y se procedió a realizar el análisis de la estructura espacial de la Cea. La selección del modelo del semivariograma teórico se basó en tres criterios: el menor residuo, el mayor ajuste (R²) y el mayor índice de dependencia espacial (Silva *et al.*, 2018). Una vez seleccionado el modelo de mejor ajuste a los criterios descritos, se interpoló la Cea mediante el método de Kriging Ordinario e isotrópico (KO), usando una ventana de interpolación de 3 x 3 (Heil y Schmidhalter, 2015). La creación de las capas de puntos, el análisis de la estructura espacial y la interpolación fueron realizados en el programa SAGA GIS versión 8.4.0.

Análisis estadístico y de correlación de la Cea y las propiedades del suelo

De los datos obtenidos en campo y laboratorio se calculó: la media, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar. Así mismo, a partir de las capas raster obtenidas por la interpolación, se extrajo el valor de la media de la Cea para cada una de las subparcelas, en cada una de las campañas de evaluación. Los valores de la media de la Cea de cada subparcela se emparejaron con los resultados correspondientes de las propiedades físicas y químicas determinadas en laboratorio. Posterior al ajuste, se prosiguió al análisis de correlación de Pearson, evaluando el grado de ajuste y nivel de significancia. Los análisis estadísticos se realizaron en R (versión 4.1.0.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estadística descriptiva de las propiedades evaluadas en el laboratorio indica que P3 presentó los mayores contenidos de nitrógeno (NO₃⁻ y NH₄⁺), arcilla (Ar) y carbono orgánico (CO) en comparación con P1 y P2 (tabla 1). Los procesos específicos de formación de suelos suceden a diferente escala, generando la variación en las propiedades físicas y químicas, incluso dentro de un mismo paisaje; lo anterior, sugiere la complejidad edáfica del área de estudio. De acuerdo a los estándares de calificación agronómica usados en la evaluación de los suelos de la región, los contenidos de Ca⁺² y CO en los tres predios

Tabla 1. Caracterización física y química del suelo de los predios evaluados en el municipio de Puerto López en el departamento de Meta, Colombia.

	A (%)	L (%)	Ar (%)	H+Al (cmolc Kg-1)	Ce (dS m-1)	CO (%)	CIC (cmolc Kg-1)	Ca+2 (cmolc Kg-1)	Mn+2 (cmolc Kg-1)	B (mg Kg-1)	N- NH4+ (mg Kg-1)	N- NO3- (mg Kg-1)	CC (%)	PMP (%)
PREDIO 1														
Med	47.41	21.95	30.64	1.64	0.19	1.13	6.22	0.24	0.83	0.19	15.67	14.51	20.77	12.14
Min	36.40	18.90	24.40	0.60	0.03	0.69	3.15	0.02	0.42	0.05	14.00	8.04	14.21	7.90
Max	56.60	26.70	38.90	2.68	0.32	1.63	10.95	1.58	1.65	0.32	21.19	27.96	27.32	19.64
D.E.	4.02	2.340	3.08	0.59	0.07	0.26	2.01	0.30	0.29	0.07	2.27	4.24	3.88	2.63
PREDIO 2														
Med	45.90	27.19	26.92	1.33	0.18	0.83	4.33	0.31	0.86	0.18	14.70	10.23	18.34	10.15
Min	30.50	18.30	20.30	0.59	0.08	0.55	2.56	0.18	0.47	0.02	14.00	6.22	11.01	7.30
Max	59.40	35.50	38.80	2.37	0.36	1.50	6.54	0.93	1.45	0.36	21.55	16.97	25.91	20.54
D.E.	9.37	4.50	5.39	0.42	0.08	0.20	1.09	0.16	0.30	0.07	1.92	2.83	3.74	2.86
PREDIO 3														
Med	19.43	36.47	44.10	2.73	0.21	1.48	11.12	1.27	2.11	0.31	17.39	24.43	25.12	17.29
Min	13.70	30.90	39.00	1.03	0.04	1.25	6.73	0.31	1.35	0.20	14.00	14.17	20.84	13.32
Max	25.90	39.70	51.30	3.88	0.82	1.68	13.99	3.35	3.42	0.51	21.31	49.21	33.16	21.36
D.E.	13.37	5.33	8.21	0.42	0.03	0.01	2.52	0.43	0.27	0.01	7.60	143.85	7.55	3.66

Media: Media, Max: Valor máximo, Min: Valor mínimo, D.E.: Desviación estándar. A%: contenido arena, L%: contenido de Limo, Ar%: contenido de arcilla, H+Al: acidez intercambiable (cmolc Kg-1), Ce: Conductividad eléctrica (dS m-1), CO: carbono orgánico del suelo (%), CIC: Capacidad de intercambio catiónico (cmolc Kg-1), CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmolc Kg-1), Ca+2: contenido de calcio (cmolc Kg-1), Mn+2: contenido de manganeso (mg Kg-1), B: contenido de boro (mg Kg-1), N-NH4+: contenido de amonio (mg Kg-1), N-NO3-: contenido de nitrato (mg Kg-1), CC: Capacidad de campo (%), PMP: Punto de Marchitez Permanente (%).

se califican como bajos (Gómez Chávez *et al.*, 2024). El bajo contenido de los elementos evaluados es una característica típica de los oxisoles, estos al ser suelos con alto grado de evolución han perdido la mayor parte de los elementos de reacción alcalina, acentuando el proceso de ferruginación, lo que explica su baja fertilidad natural (IGAC, 2004). La baja concentración de elementos con reacción alcalina, como el Ca²⁺, puede explicarse por su alta movilidad en comparación con el aluminio durante el proceso de meteorización (Santos *et al.*, 2024). El promedio de la acidez intercambiable en los tres predios supera el umbral 1.00 cmc kg⁻¹, el principal factor asociado a la acidez del suelo es el aluminio intercambiable (Zhao *et al.*, 2024). Las altas concentraciones de aluminio en el complejo de cambio limitan los procesos fisiológicos de las plantas, el principal efecto negativo se refleja en el crecimiento y desarrollo de la raíz (Issayeva *et al.*, 2025). Así mismo, el aluminio presenta interacciones con otros elementos químicos que son fundamentales en la nutrición vegetal, entre ellos el fósforo, lo anterior es más crítico en aquellas especies vegetales que no se encuentran adaptadas a esta condición (Munyanza *et al.*, 2024). Los bajos contenidos de carbono orgánico determinados en los diferentes predios se explican a la interacción existente entre alta temperatura y pluviosidad en la zona de estudio, condición que acelera los procesos de mineralización del carbono orgánico, reduciendo su contenido en el perfil del suelo (Sun y Han, 2024).

Los valores obtenidos para las variables evaluadas en este trabajo se encuentran dentro de los rangos reportados en otras investigaciones realizadas en oxisoles de la altillanura de Colombia (IGAC y CIAF,

2018; Gómez Chávez *et al.*, 2024). La conductividad eléctrica determinada en el laboratorio (Ce) es baja, condición que puede ser explicada por el bajo contenido de calcio, la alta acidez intercambiable y el alto grado de meteorización de los suelos (Corwin y Scudiero, 2020) (tabla 1). Las condiciones ambientales de alta precipitación y alta temperatura que predominan en la zona de estudio, y favorecen la lixiviación de los suelos, reduciendo la Conductividad eléctrica (Bañón *et al.*, 2021). La mayor Ce determinada en el laboratorio se midió en el predio 3, que es el que tiene el mayor contenido de arcillas (tabla 1). Los suelos con alto contenido de arena se caracterizan por tener una baja conductividad eléctrica, ya que esta fracción es menos reactiva en comparación con la fracción arcilla (Rieder *et al.*, 2024). El predio 3 presentó el mayor valor para las constantes de humedad capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (tabla 1). Las constantes de humedad del suelo son altamente dependientes de la textura y el tipo de arcillas presentes en el suelo; de forma general con el incremento del contenido de arcillas, se incrementa la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Pasaribu *et al.*, 2023). Sin embargo, las constantes de humedad son también influenciadas por la interconexión existente entre el espacio poroso y las condiciones asociadas al manejo del medio edáfico (Abdallah *et al.*, 2021).

La conductividad eléctrica aparente (Cea) medida en campo con el equipo EM38-MK2 fue más alta en el predio 3, en comparación con el predio 1 y 2 en los tres momentos de evaluación (tabla 2). El valor de la Cea es afectado por el contenido de coloides presentes en el suelo (minerales y orgánicos), cuanto

mayor es su contenido, mayor es la respuesta a la emisión electromagnética (Becker *et al.*, 2022). Lo anterior sugiere, que el contenido de arcilla y carbono orgánico son dos factores de relevancia en la medición de la variable en las condiciones edafoclimáticas de este estudio. En los tres lugares evaluados y en las diferentes campañas de muestreo, la mayor respuesta se obtuvo cuando la medición se realizó con el dipolo horizontal y bobina de 0.5 m de espaciamiento; configuración que permite medir la respuesta del suelo a una profundidad de aproximadamente 37.5 cm (Petsetidi y Kargas, 2023; Geonics Limited Ontario, 2002) (tabla 2). La Cea medida en este trabajo, no excedió los valores obtenidos con el mismo modelo de equipo en oxisoles de Brasil (Sanches *et al.*, 2022). Lo anterior, valida los resultados obtenidos en el presente estudio.

El análisis de la estructura espacial de la Cea mostró una dependencia espacial en las mediciones realizadas en las tres áreas evaluadas (Tabla 3). Se destaca que el índice de dependencia espacial (IDE) en las tres campañas y predios fue superior a 0.50 (Tabla 3). Esto confirma que hay variaciones en función del movimiento del equipo. Lo expuesto, indica que las variaciones son el producto del comportamiento regionalizado de la variable (Cea) (Silva *et al.*, 2018). Los modelos con mejor ajuste en la representación de la semivarianza fueron de tipo: esférico, gaussiano y exponencial (tabla 3), indicando

que las mediciones de la Cea se estabilizan dentro de la frontera del área de estudio (Oliver y Webster, 2015). Por lo tanto, se puede inferir que el sensor EM38-MK2 fue sensible en condiciones de suelos arenosos y arcillosos de alto grado de evolución, además de que su uso es apropiado para detectar variaciones edáficas en pequeñas áreas (tabla 3 figura 1). La dependencia espacial de las mediciones realizadas con el sensor EM38-MK2 en múltiples escalas también ha sido documentada por Sanches *et al.* (2022); Grisales *et al.* (2022); Karp *et al.* (2023). En la figura 1, se observa que a partir de la interpolación de la Cea es posible diferenciar zonas de valores altos y bajos, lo que permite agrupar zonas homogéneas, constatando que esta tecnología puede ser aplicable en la delimitación de zonas de manejo específico en las condiciones de la altillanura de Colombia.

La Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 0.5 m presentó una correlación alta y significativa con el contenido de arena (A%), limo (L%), arcilla (Ar%), carbono orgánico (CO), manganeso (Mn), Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Tabla 4). Una correlación similar se obtuvo cuando la Cea fue medida usando la configuración de dipolo horizontal y la bobina de 1.0 m (Tabla 4). El predio con mayor contenido de arcillas (P3) en todas las mediciones presentó los valores más altos de Cea (tabla 2). La alta correlación

Tabla 2. Cea determinada con el sensor EM38-MK2 en tres predios y en tres campañas diferentes en el municipio de Puerto López, Meta.

Pred	Conf	n	Media	D.E.	Mín	Máx
Campaña 1						
P1	H 0.5 m	232.00	3.48	1.88	1.36	5.67
	H 1.0 m	232.00	2.42	0.38	1.86	3.14
P2	H 0.5 m	284.00	3.08	1.94	1.20	6.09
	H 1.0 m	284.00	1.65	0.35	1.02	1.94
P3	H 0.5 m	236.00	9.58	2.30	6.55	13.14
	H 1.0 m	236.00	6.88	1.32	5.48	8.67
Campaña 2						
P1	H 0.5 m	180.00	4.89	3.17	1.68	9.41
	H 1.0 m	180.00	1.81	0.87	0.75	2.98
P2	H 0.5 m	145.00	2.98	2.12	1.01	7.89
	H 1.0 m	145.00	1.30	0.57	0.42	2.23
P3	H 0.5 m	150.00	18.14	2.74	14.18	22.69
	H 1.0 m	150.00	9.67	1.82	8.24	14.00
Campaña 3						
P1	H 0.5 m	308.00	33.51	1.91	30.44	36.23
	H 1.0 m	308.00	2.76	1.15	1.37	5.32
P2	H 0.5 m	316.00	38.28	1.35	35.64	39.77
	H 1.0 m	316.00	6.07	0.94	5.25	8.03
P3	H 0.5 m	328.00	31.50	1.47	29.31	34.38
	H 1.0 m	328.00	8.08	1.16	7.06	10.73

Pred: Predio, **Conf:** Configuración del equipo (dipolo y bobina), **n:** número de mediciones, **Max:** Valor máximo (mS m^{-1}), **Mín:** Valor mínimo (mS m^{-1}), **D.E.:** Desviación estándar, **H 0.5 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 0.5 m, **H 1.0 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 1 m.

Tabla 3 Análisis de la dependencia espacial de la conductividad eléctrica aparente Cea medida.

Campaña	Conf	Modelo	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Rango	IDE	R2
Predio 1 (P1)							
1	H 1.0 m	Esf	0.80	160.70	6.40	0.99	0.11
	H 0.5 m	Esf	2.50	35.32	6.50	0.92	0.15
2	H 1.0 m	Exp	1.23	2.52	160.20	0.51	0.86
	H 0.5 m	Exp	6.39	22.95	99.30	0.72	0.95
3	H 1.0 m	Exp	0.81	7.32	6.30	0.88	0.14
	H 0.5 m	Esf	3.80	36.38	8.50	0.89	0.41
Predio 2 (P2)							
1	H 1.0 m	Exp	0.11	0.87	9.30	0.86	0.26
	H 0.5 m	Gau	5.76	29.81	220.83	0.80	0.97
2	H 1.0 m	Gau	0.01	19.76	11.25	0.99	0.54
	H 0.5 m	Gau	0.10	248.70	20.78	1.00	0.57
3	H 1.0 m	Exp	1.13	10.85	3.30	0.89	0.13
	H 0.5 m	Exp	7.50	117.60	5.70	0.93	0.21
Predio 3 (P3)							
1	H 1.0 m	Esf	6.36	12.37	14.70	0.50	0.54
	H 0.5 m	Gau	37.30	31.76	20.61	0.51	0.87
2	H 1.0 m	Gau	0.10	39.10	11.95	0.99	0.62
	H 0.5 m	Exp	0.10	52.88	22.50	0.98	0.65
3	H 1.0 m	Exp	1.00	7.25	9.30	0.86	0.51
	H 0.5 m	Esf	1.10	39.12	5.80	0.97	0.44

Conf: Configuración del equipo (dipolo y bobina), **H 0.5 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 0.5 m, **H 1.0 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 1 m. **Exp:** modelo de semivariograma exponencial, **Gau:** modelo de semivariograma gaussiano, **Esf:** modelo de semivariograma esférico, **Rango:** en metros, **IDE:** índice de dependencia espacial $C0/(C0+C)$, **R2:** ajuste del modelo.

de la Cea medida con el sensor EM38-MK2 en función del contenido de arcilla ha sido comúnmente reportada en estudios que usan este equipo (Rodrigues *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020). Los estudios de la mineralogía de la fracción arcilla de los Oxisoles de la altillanura de Colombia indican el predominio de las arcillas de baja actividad originados por el proceso de lateralización, que

concentra sesquióxidos de hierro y aluminio (IGAC y CIAF, 2018). Esta condición puede afectar la respuesta del suelo a la inducción electromagnética. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que el sensor EM38-MK2 es sensible a la presencia de estos coloides y que es posible correlacionar las propiedades del suelo cuando tiene arcillas de baja actividad.

Tabla 4. Correlación de la Cea medida con el dipolo Horizontal y las bobinas de 0.5 m y 1 m con las propiedades físicas y químicas medidas en las áreas experimentales.

Configuración	Variable	Pearson	p-valor	Configuración	Variable	Pearson	p-valor	n
H 0.5 m	A%	-0.83	0.00	H 1.0 m	A%	-0.86	0.00	54.00
	L%	0.71	0.00		L%	0.76	0.00	54.00
	Ar%	0.84	0.00		Ar%	0.85	0.00	54.00
	H+Al	0.60	0.00		H+Al	0.69	0.00	54.00
	CO	0.70	0.00		CO	0.74	0.00	54.00
	CIC	0.69	0.00		CIC	0.77	0.00	54.00
	CICE	0.64	0.00		CICE	0.79	0.00	54.00
	Ca ⁺²	0.59	0.00		Ca ⁺²	0.69	0.00	54.00
	Mn ⁺²	0.81	0.00		Mn ⁺²	0.82	0.00	54.00
	B	0.64	0.00		B	0.66	0.00	54.00
	N-NH ₄ ⁺	0.47	0.00		N-NH ₄ ⁺	0.49	0.00	54.00
	N-NO ₃ ⁻	0.34	0.01		N-NO ₃ ⁻	0.48	0.00	54.00
	CC	0.69	0.00		CC	0.74	0.00	45.00
	PMP	0.83	0.00		PMP	0.86	0.00	45.00

Configuración: combinación dipolo bobina, **H 0.5 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 0.5 m, **H 1.0 m:** Cea medida con el dipolo horizontal y la bobina de 1 m. **A%:** contenido arena, **L%:** contenido de Limo, **Ar%:** contenido de arcilla, **H+Al:** acidez intercambiable (cmolc Kg⁻¹), **CO:** carbono orgánico del suelo (%), **CIC:** Capacidad de intercambio catiónico (cmolc Kg⁻¹), **CICE:** Capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmolc Kg⁻¹), **Ca⁺²:** contenido de calcio (cmolc Kg⁻¹), **Mn⁺²:** contenido de manganeso (mg Kg⁻¹), **B:** contenido de boro (mg

Kg-1), N-NH₄⁺: contenido de amonio (mg Kg-1), N-NO₃⁻: contenido de nitrato (mg Kg-1), CC: Capacidad de campo (%), PMP: Punto de Marchitez Permanente (%), n: número de mediciones.

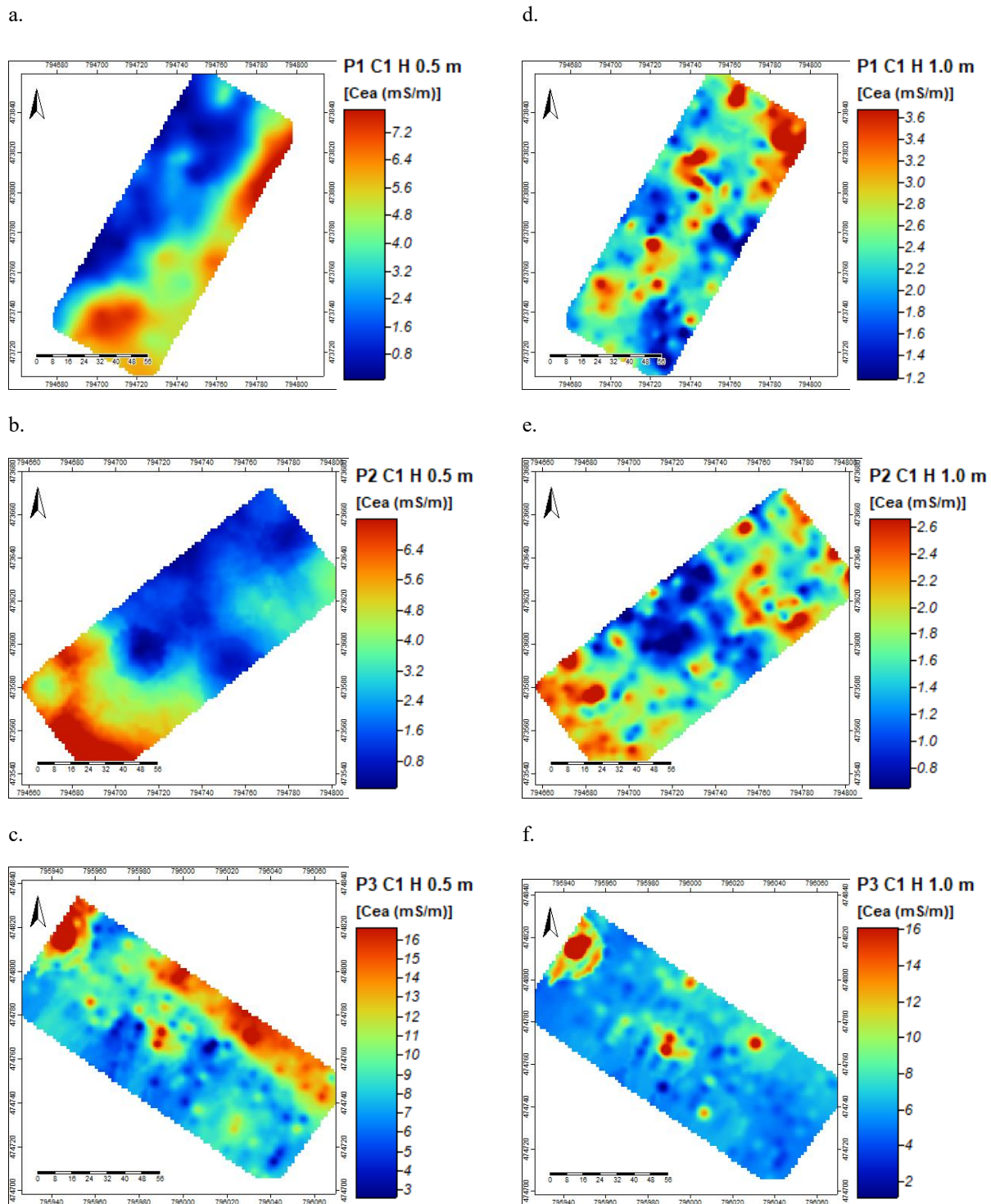


Figura 1. Conductividad eléctrica aparente (Cea) en tres oxisoles: a. Predio 1 dipolo H, bobina 0.5 m. b. Predio 2 dipolo H, bobina 0.5 m. c. Predio 3 dipolo H, bobina 0.5 m. d. Predio 1 dipolo H, bobina 1.0 m. e. Predio 2. dipolo H, bobina 1.0 m. f. Predio 3 dipolo H, bobina 1.0 m.

En suelos con bajos contenidos de cationes y con alto contenido de arcillas de tipo 1:1 se ha reportado que la Cea se correlaciona con las constantes de humedad, el contenido de arcillas, la capacidad de intercambio catiónico y el carbono orgánico, de forma similar a lo descrito en este trabajo (Petsetidi y Kargas, 2023). Las constantes de humedad del suelo son dependientes de la textura y estructura (Pasaribu *et al.*, 2023). Los contenidos de A, L, Ar, CC y PMP son propiedades del suelo que tienen una influencia en la susceptibilidad eléctrica y electromagnética (Pentós *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022). Además, el tamaño y las características de la conductividad de los poros han mostrado tener un efecto en la resistividad del suelo (Robain *et al.*, 1996; Mello *et al.*, 2022).

La correlación de la Cea con el contenido de calcio (Ca^{+2}), boro (B) y la acidez intercambiable (H^{+}Al) no fue tan elevada como la obtenida para las variables arena (A %), limo (L %), arcilla (Ar %), carbono orgánico (CO), manganeso (Mn^{+2}), Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Tabla 4). La relación de Cea medida con equipos geofísicos y variables del suelo son complejas, varían entre suelos, en el perfil y dentro de una misma área; dificultando en algunas oportunidades observar una tendencia clara entre estas (Corwin y Scudiero, 2020). Las correlaciones más bajas se presentaron entre la Cea y el contenido de NO_3^- y NH_4^+ (inferiores a 0.5) (tabla 4). El nitrógeno es un elemento que tiene incidencia en la conductividad eléctrica del suelo, a pesar de esto, factores como la carga de las arcillas pueden tener un efecto sobre los procesos de transformación y pérdida del elemento dificultando su cuantificación en el laboratorio y su determinación con el equipo EM38-MK2 (Steenekamp *et al.*, 2024). El nitrógeno se caracteriza por ser un elemento muy dinámico que tiene muchas transformaciones en el suelo, que se acentúan en las condiciones de clima tropical y húmedo, como las del presente estudio, lo que puede explicar su bajo contenido y la baja correlación con la Cea (Bento *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

La conductividad eléctrica aparente del suelo (Cea) medida con el electromagnetómetro EM38-MK2 se correlacionó con las propiedades físicas y químicas determinadas a la profundidad de 0 a 20 cm en los tres Oxisoles evaluados en la altillanura de Colombia. Los valores de la Cea se correlacionaron de forma positiva y altamente significativa con: el porcentaje de arcilla, limo, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, acidez intercambiable, capacidad de intercambio catiónico, contenido de carbono orgánico, calcio, magnesio, boro, nitrato y amonio. Inversamente, la correlación fue negativa con el contenido de arena, evidenciando su efecto negativo en la respuesta del suelo a la inducción

electromagnética. El análisis de la estructura espacial de la Cea, permitió identificar zonas diferenciadas en las tres áreas en las diferentes campañas de muestreo; comprobando la capacidad del EM38-MK2 como una herramienta de caracterización rápida y eficiente en suelos de alto grado de evolución y con minerales de baja actividad en la fracción arcilla.

Los resultados obtenidos en este trabajo validan la adopción de tecnologías de inducción electromagnética en estudios de índole agrícola o ambiental. En el futuro los trabajos de investigación se deben enfocar en evaluar y validar la respuesta de la Cea en diferentes condiciones de manejo, que permitan la construcción de metodologías y modelos para la predicción de propiedades físicas y químicas en Oxisoles, lo anterior para lograr una gestión sostenible de los suelos en la altillanura de Colombia.

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a la Asociación Nacional de Mujeres Campesinas Negras e Indígenas de Colombia (ANMUCIC), en particular a: Eloisa Aguirre, Claudia Villa, Paola Torres, por permitir el montaje de las parcelas experimentales y a Ana Doris Becerra Reyes por el apoyo logístico de esta investigación.

Funding. We would like to express our sincere gratitude to the “Sistema General de Regalías” (SGR) of the Arauca, Casanare, Meta, Guaviare, Vaupés, Guainía and Vichada departments, which provided the funding to the research project: “**Investigación de la transformación productiva del suelo de altillanura mediante la producción de cerdos de engorde a campo abierto, en predios de pequeños y medianos productores, generando empoderamiento de la mujer en Puerto López**”.

Conflict of interest. Do not apply.

Compliance with ethical standards. Does not apply.

Data availability. All data is presented in the present paper.

Author contribution statement (CRediT). S.S. Ulloa Galeano – Investigation, Formal analysis, Writing – Original draft. J.A. Carrillo-Rozo – Investigation, Conceptualization. S.D. Parra-González – Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – Original draft, Writing - review and editing, supervision.

REFERENCES

Abdallah, A.M., Jat, H.S., Choudhary, M., Abdelaty, E.F., Sharma, P.C. and Jat, M.L., 2021.

- Conservation Agriculture Effects on Soil Water Holding Capacity and Water-Saving Varied with Management Practices and Agroecological Conditions: A Review. *Agronomy*, 11(9), pp. 1681. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>
- Bañón, S., Álvarez, S., Bañón, D., Ortuño, M.F. and Sánchez-Blanco, M.J., 2021. Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors. *Scientia Horticulturae*, 285, pp. 110171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110171>
- Becker, S.M., Franz, T.E., Abimbola, O., Steele, D.D., Flores, J.P., Jia, X., Scherer, T.F., Rudnick, D.R. and Neale, C.M.U., 2022. Feasibility assessment on use of proximal geophysical sensors to support precision management. *Vadose Zone Journal*, 21(6), pp. 20228. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20228>
- Bento, C.B., Brandani, C.B., Filoso, S., Martinelli, L.A. and Carmo, J.B.D., 2021. Effects of extensive-to-intensive pasture conversion on soil nitrogen availability and CO₂ and N₂O fluxes in a Brazilian oxisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 321, pp. 107633. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107633>
- Bernal R.J., Peña A., Díaz N. and Obano D., 2013. Condiciones Climáticas de la Altillanura Plana Colombiana en el Contexto de Cambio Climático. In: Amézquita E., Rao I., Rivera M., Corrales I. and J. Bernal, eds. *Sistemas Agropastoriles: Un Enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*. Cali: International Center for Tropical Agriculture. pp. 28 – 42.
- Corwin, D.L. and Scudiero, E., 2020. Field-scale apparent soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), pp. 1405–1441. <https://doi.org/10.1002/saj2.20153>
- Doolittle, J.A. and Brevik, E.C., 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223–225, pp. 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>
- Ehosioko, S., Adebayo, M.B., Bailey, V.L., Peixoto, R.B., Emmanuel, E.D., Machado-Silva, F., Regier, P.J., Spanbauer, T., Thomas, S.P., Ward, N.D., Weintraub, M.N. and Doro, K. O., 2024. Geophysical methods reveal the soil architecture and subsurface stratigraphic heterogeneities across land-lake interfaces along Lake Erie. *Journal of Soils and Sediments*, 24(6), pp. 2215–2236. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03787-w>
- Estrada-Godoy, F., Cruz-Cárdenas, G., Ochoa-Estrada, S. and Silva, J.T. 2023. Cartografía digital de suelos con regresión-Kriging y datos de sensores remotos. *Revista terra latinoamericana*, 41. pp. 12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1617>
- Geonics Limited Ontario., 2002. *EM38-MK2 ground conductivity meter, operating manual*. Ontario: Geonics. pp. 32.
- Gómez Chávez, A.F., Feo Mahecha, J.K. and Parra Gonzalez, S.D., 2024. Estimación de analitos del suelo en la altillanura, con teledetección sentinel-2 y modelos de regresión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), pp. 269–289. <https://doi.org/10.22490/21456453.7003>
- Grisales, E.F., Darghan, A.E. and Rivera, C.A., 2022. Use of two relative depths of the soil apparent electrical conductivity to define experimental blocks with spatial regression models. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 20(1), pp. 1102. <https://doi.org/10.5424/sjar/2022201-18631>
- He, Y., Li, X. and Jin, M., 2023. Temporal and Spatial Assessment of Soil Salinity Post-Flood Irrigation: A Guide to Optimal Cotton Sowing Timing. *Agronomy*, 13(9), pp. 2246. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092246>
- Heil, K. and Schmidhalter, U., 2015. Comparison of the EM38 and EM38-MK2 electromagnetic induction-based sensors for spatial soil analysis at field scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 110, pp. 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.014>
- Henrion, M., Li, Y., Koganti, T., Bechtold, M., Jonard, F., Opfergelt, S., Vanacker, V., Van Oost, K. and Lambot, S., 2024. Mapping and monitoring peatlands in the Belgian Hautes Fagnes: Insights from Ground-penetrating radar and Electromagnetic induction characterization. *Geoderma Regional*, 37, pp. 795. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00795>

- ICONTEC., 2007. *NTC 5526:2007 Calidad de suelo. Determinación de disponibles: Cobre, manganeso. Bogotá: Icontec. micronutrientes zinc, hierro y manganeso. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 8.*
- ICONTEC., 2008. *NTC 5595:2008 Calidad de suelo. Determinación del nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 11.*
- ICONTEC., 2014. *NTC 5268:2014 Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 5.*
- ICONTEC., 2016. *NTC 5349:2016 Calidad de suelo. Determinación de las bases cambiables: Método del acetato amonio 1m, pH 7,0. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 9.*
- ICONTEC., 2017. *NTC 5263:2017 Calidad del suelo. Determinación de la acidez, aluminio e hidrógeno intercambiables. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 10.*
- ICONTEC., 2018b. *NTC 6299:2018 Calidad del suelo. Determinación de la textura por bouyoucos. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 11.*
- ICONTEC., 2022a. *NTC-ISO 11464:2022 Calidad del suelo. Pretratamiento de muestras para análisis fisicoquímicos. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 14.*
- ICONTEC., 2022b. *NTC 5596:2022 Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 15.*
- ICONTEC., 2022c. *NTC 5403:2021 Calidad del suelo. Determinación del carbono orgánico. Bogotá, Colombia: Icontec. pp. 18.*
- IGAC. and CIAF., 2018. *La altillanura colombiana: aspectos biofísicos. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia. pp. 132.*
- IGAC. 2004. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento del Meta. (2da ed.). Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia. pp. 496.*
- Karp, F.H.S., Adamchuk, V.I., Melnitchouck, A., Allred, B., Dutilleul, P. and Martinez, L. R., 2023. Validation And Potential Improvement of Soil Survey Maps Using Proximal Soil Sensing. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 28(1), pp. 45–61. <https://doi.org/10.32389/JEEG22-018>
- Lal, R., 2017. Geophysical Methods. In *Encyclopedia of Soil Science*, CRC Press. <https://doi.org/10.1081/E-ESS3-120053754>
- Loiseau, B., Carrière, S.D., Jougnot, D., Singha, K., Mary, B., Delpierre, N., Guérin, R. and Martin-StPaul, N.K., 2023. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems – A review. *Science of The Total Environment*, 899, 165503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165503>
- Mello, D.C.D., Safanelli, J.L., Poppiel, R.R., Veloso, G.V., Cabrero, D.R.O., Greschuk, L.T., De Oliveira Mello, F.A., Francelino, M.R., Ker, J.C., Leite, E.P., Fernandes-Filho, E.I., Schaefer, C.E.G.R. and Demattê, J.A.M., 2022. Soil apparent electrical conductivity survey in different pedoenvironments by geophysical sensor EM38: a potential tool in pedology and pedometry studies. *Geocarto International*, 37(26), pp. 13057–13078. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2076913>
- Oliver, M.A. and Webster, R., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15865-5>
- Ondrasek, G. and Rengel, Z., 2021. Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions. *Science of The Total Environment*, 754, pp. 142432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142432>
- Pasaribu, N.P., Wahjunie, E.D. and Tarigan, S.D., 2023. Characteristics of soil physical properties in different soil management of oxisols and inceptisols. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, 16(2), pp. 83–90. <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v16i2.19869>
- Pathirana, S., Lambot, S., Krishnapillai, M., Cheema, M., Smeaton, C. and Galagedara, L., 2023. Ground-Penetrating Radar and Electromagnetic Induction: Challenges and Opportunities in Agriculture. *Remote Sensing*, 15(11), pp. 2932. <https://doi.org/10.3390/rs15112932>

- Pentoś, K., Pieczarka, K. and Serwata, K., 2021. The Relationship between Soil Electrical Parameters and Compaction of Sandy Clay Loam Soil. *Agriculture*, 11(2), pp. 114. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020114>
- Petsetidi, P.A. and Kargas, G., 2023. Assessment and Mapping of Soil Salinity Using the EM38 and EM38MK2 Sensors: A Focus on the Modeling Approaches. *Land*, 12(10), pp. 1932. <https://doi.org/10.3390/land12101932>
- Rab, M.A., Chandra, S., Fisher, P.D., Robinson, N.J., Kitching, M., Aumann, C.D. and Imhof, M., 2011. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. *Soil Research*, 49(5), pp. 389–407. <https://doi.org/10.1071/SR10160>
- Rieder, L., Amann, T. and Hartmann, J., 2024. Soil electrical conductivity as a proxy for enhanced weathering in soils. *Frontiers in Climate*, 5, pp. 1283107. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1283107>
- Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M. and Atangana, Q.Y., 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics*, 34(4), pp. 237–253. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)00023-2)
- Rodrigues, H.M., Vasques, G.M., Oliveira, R.P., Tavares, S.R.L., Ceddia, M.B. and Hernani, L.C., 2020. Finding Suitable Transect Spacing and Sampling Designs for Accurate Soil ECa Mapping from EM38-MK2. *Soil Systems*, 4(3), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030056>
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T. and Or, D., 2018. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. *Reviews of Geophysics*, 56(4), pp.672–697. <https://doi.org/10.1029/2018RG000611>
- Sanches, G.M., Otto, R., Adamchuk, V. and S.G. Magalhães. P., 2022. Spatial variability of soil attributes by an electromagnetic induction sensor: A framework of multiple fields assessment under Brazilian soils. *Biosystems Engineering*, 216, pp. 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.017>
- Santos, D.P., Santos, G.G., Oliveira, V.Á. de, Silva, G.C. da, Flores, R.A., Azevedo, A.C., Júnior, V.S. de S. and Pereira, M.G., 2024. Chemical and mineralogical constitution of redoximorphic features and mechanism of formation of Plinthosols from the Araguaia River plain, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230115>
- Silva, C.M.C.A.C., Barbosa, R.S., Nascimento, C.W.A.D., Silva, Y.J.A.B.D. and Silva, Y.J.A.B.D., 2018. Geochemistry and Spatial Variability of Rare Earth Elements in Soils under Different Geological and Climate Patterns of the Brazilian Northeast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42. pp. 1–17. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170342>
- Steenekamp, D., Van-Rensburg, L., Barnard, J. and Du-Preez, C., 2024. Are inorganic nitrogen concentrations in potassium chloride and saturated paste extracts of irrigated soils comparable?. *South African Journal of Plant and Soil*, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/02571862.2023.2294448>
- Sun, R. and Han, G., 2024. A comprehensive review of multi-scale mechanisms of soil carbon mineralization: From micro processes to macro ecosystems. *Geographical Research Bulletin*, 3, pp. 471–498. https://doi.org/10.50908/grb.3.0_471
- Tsai, C.C. and Lin, C.H., 2022. Review and Future Perspective of Geophysical Methods Applied in Nearshore Site Characterization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), pp. 344. <https://doi.org/10.3390/jmse10030344>
- Van-Leeuwen, C., Schmutz, M. and De-Rességuier, L., 2024. The contribution of near surface geophysics to measure soil related terroir factors in viticulture: A review. *Geoderma*, 449, pp. 116983. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116983>
- Zajícová, K. and Chuman, T., 2019. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*, 343, pp. 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024>
- Zhao, D., Li, N., Zare, E., Wang, J. and Triantafyllis, J., 2020. Mapping cation exchange capacity

- using a quasi-3d joint inversion of EM38 and EM31 data. *Soil and Tillage Research*, 200, pp. 104618. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104618>.
- Zhao, W., Hu, W., Zhang, F., Shi, Y., Wang, Y., Zhang, X., Feng, T., Hong, Z., Jiang, J., and Xu, R. 2024. Exchangeable acidity characteristics of farmland black soil in northeast China. *Geoderma Regional*, 38, pp. 852. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00852>
- Zhao, D., Wang, J., Zhao, X. and Triantafilis, J., 2022. Clay content mapping and uncertainty estimation using weighted model averaging. *Catena*, 209, pp. 105791. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105791>