



Variabilidad edáfica y topográfica del café orgánico en Chirinos, Cajamarca: análisis espacial mediante SIG

Soil and topographic variability of organic coffee in Chirinos, Cajamarca: spatial analysis using GIS

Delvis Sánchez-Díaz¹; Henry Jesús Carrillo-Leonardo¹; Eleazar Manuel Rufasto-Campos¹; José Wilson Gómez-Cumpa¹

¹ Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; Lambayeque, Perú.

ORCID de los autores:

D. Sánchez-Díaz: <https://orcid.org/0000-0003-0161-0620>

H. S. Carrillo-Leonardo: <https://orcid.org/0009-0003-8607-873X>

E. M. Rufasto-Campos: <https://orcid.org/0000-0001-9214-1852>

J. W. Gómez-Cumpa: <https://orcid.org/0000-0001-7071-6248>

RESUMEN

Se implementó un sistema de información geográfica para analizar la variabilidad espacial del suelo en cafetales orgánicos de Chirinos, Cajamarca, Perú, a partir de 130 parcelas georreferenciadas de pequeños productores. Se integraron análisis físico-químicos del suelo con variables topográficas derivadas del relieve, con énfasis en materia orgánica, densidad aparente, pH, acidez intercambiable y aluminio cambiante. La metodología combinó estadística descriptiva, ajuste de relaciones funcionales entre variables críticas, comparación de métodos de interpolación e interpolación geoestadística mediante kriging ordinario. Los resultados evidenciaron una marcada heterogeneidad edáfica y topográfica, incompatible con un manejo uniforme por parcela. Se observó una relación inversa entre materia orgánica y densidad aparente ($R^2 = 0,4775$), así como una asociación más fuerte entre pendiente y aluminio cambiante ($R^2 = 0,7055$). La cartografía generada permitió identificar sectores con mayor riesgo de acidez y otros con mejor condición física del suelo, mostrando el valor del análisis espacial para sustentar decisiones diferenciadas de manejo en cafetales orgánicos de ladera. El estudio aporta una metodología reproducible para el análisis predial del suelo en sistemas cafetaleros andinos.

Palabras clave: Sistemas de información geográfica; café; agricultura orgánica; geoestadística; suelos ácidos.

ABSTRACT

A geographic information system was implemented to analyze the spatial variability of soil in organic coffee plantations in Chirinos, Cajamarca, Peru, using data from 130 georeferenced plots belonging to small-scale producers. Physicochemical analyses of the soil were integrated with topographic variables derived from the terrain, with an emphasis on organic matter, bulk density, pH, exchangeable acidity, and exchangeable aluminum. The methodology combined descriptive statistics, adjustment of functional relationships between critical variables, comparison of interpolation methods, and geostatistical interpolation using ordinary kriging. The results revealed marked edaphic and topographic heterogeneity, incompatible with uniform management across plots. An inverse relationship was observed between organic matter and bulk density ($R^2 = 0.4775$), as well as a stronger association between slope and exchangeable aluminum ($R^2 = 0.7055$). The resulting maps allowed for the identification of areas with a higher risk of acidity and others with better soil physical condition, demonstrating the value of spatial analysis for supporting differentiated management decisions in organic hillside coffee plantations. The study provides a reproducible methodology for on-farm soil analysis in Andean coffee systems..

Keywords: Geographic information systems; coffee; organic agriculture; geostatistics; acid soils.

1. Introducción

El café (*Coffea arabica* L.) es un cultivo estratégico en las zonas andinas y de ceja de selva del Perú, donde miles de pequeños productores lo cultivan bajo sistemas orgánicos asociados a arreglos agroforestales. En ambientes montañosos, sin embargo, la marcada heterogeneidad edáfica y topográfica dificulta el manejo uniforme del cultivo: dentro de una misma finca pueden coexistir diferencias importantes de acidez, materia orgánica, densidad aparente, pendiente, humedad y topográfica. Por ello, resulta necesario implementar herramientas que permitan identificar espacialmente esa variabilidad y traducirla en decisiones agronómicas diferenciadas.

Los sistemas de información geográfica (SIG) y los enfoques de análisis espacial han demostrado su utilidad para evaluar aptitud agrícola y apoyar decisiones territoriales en café (Arévalo-Luna et al., 2020; Figueroa-Saavedra et al., 2024; Liu et al., 2025; Nigussie et al., 2024; Sadeghi et al., 2025). No obstante, la mayoría de esos estudios opera a escala regional y prioriza la expansión potencial del cultivo, más que el manejo agronómico dentro de áreas productivas ya establecidas. Existe, por tanto, información sobre dónde cultivar café, pero escasa evidencia sobre cómo manejar un sistema cafetalero espacialmente heterogéneo al interior de la finca. Esta brecha es especialmente relevante en sistemas orgánicos de montaña, donde la eficiencia de prácticas como el encalado, la incorporación de materia orgánica y la conservación del suelo depende de diferencias espaciales finas que los diagnósticos generales no siempre capturan.

La evidencia empírica confirma que las propiedades del suelo y el relieve interactúan de manera compleja en sistemas cafetaleros. Hossain et al. (2023) mostraron que la materia orgánica se relaciona estrechamente con propiedades físicas y químicas del suelo, reforzando su valor como indicador de calidad edáfica. Wang et al. (2024) evidenciaron que en áreas montañosas la topografía condiciona la distribución espacial de las propiedades edáficas, lo que sugiere que la pendiente puede vincularse con la expresión localizada de restricciones químicas. Asimismo, Omon et al. (2025) y Lense et al. (2022) documentaron que los sistemas agroforestales y las prácticas de manejo influyen en la acumulación y pérdida de carbono orgánico

en cafetales, aunque la integración operativa de estas variables a escala predial en sistemas orgánicos andinos sigue siendo limitada.

A partir de estos antecedentes, se planteó que la heterogeneidad espacial de variables como materia orgánica, densidad aparente, pH, acidez intercambiable, aluminio intercambiable y pendiente permite identificar zonas con restricciones y potencialidades distintas, y que su representación mediante SIG y geoestadística proporciona una base sólida para el manejo sitio-específico. En consecuencia, el objetivo del estudio fue implementar un SIG para analizar la variabilidad espacial del suelo en cafetales orgánicos de Chirinos, Cajamarca, integrando análisis físico-químicos del suelo y variables topográficas. Para ello se trabajó con 130 parcelas georreferenciadas de pequeños productores y se aplicaron estadística descriptiva, análisis de relaciones funcionales e interpolación geoestadística para generar mapas temáticos del suelo.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el distrito de Chirinos, provincia de San Ignacio, región Cajamarca, Perú, en un paisaje de ceja de selva andina con predominio de laderas cafetaleras. El ámbito de trabajo se ubicó entre 800 y 2000 m s. n. m. (coordenadas de referencia: 5° 18' 19" S, 78° 53' 55" O; altitud media 1809 m s. n. m.). El trabajo de campo se concentró en parcelas de caficultores asociados a la Cooperativa Cafetalera La Prosperidad de Chirinos.

2.2. Unidades de observación y muestreo de suelo

La unidad de observación fue la parcela cafetalera con certificación orgánica. Se trabajó con 130 parcelas georreferenciadas y, en cada una, se obtuvo una muestra compuesta de suelo de aproximadamente 2 kg. Cada muestra compuesta se integró con no menos de 25 submuestras, en función del área de la parcela. El muestreo se enfocó en la capa arable superficial, entre 0 y 30 cm de profundidad, por ser el estrato directamente influido por el manejo agronómico, la incorporación de residuos orgánicos y la actividad radicular del cultivo. La extracción se realizó con un barreno de 3,2 cm de diámetro, doble torsión, ángulo de 5,7 cm y rosca de 1/2" × 13 hilos por pulgada.

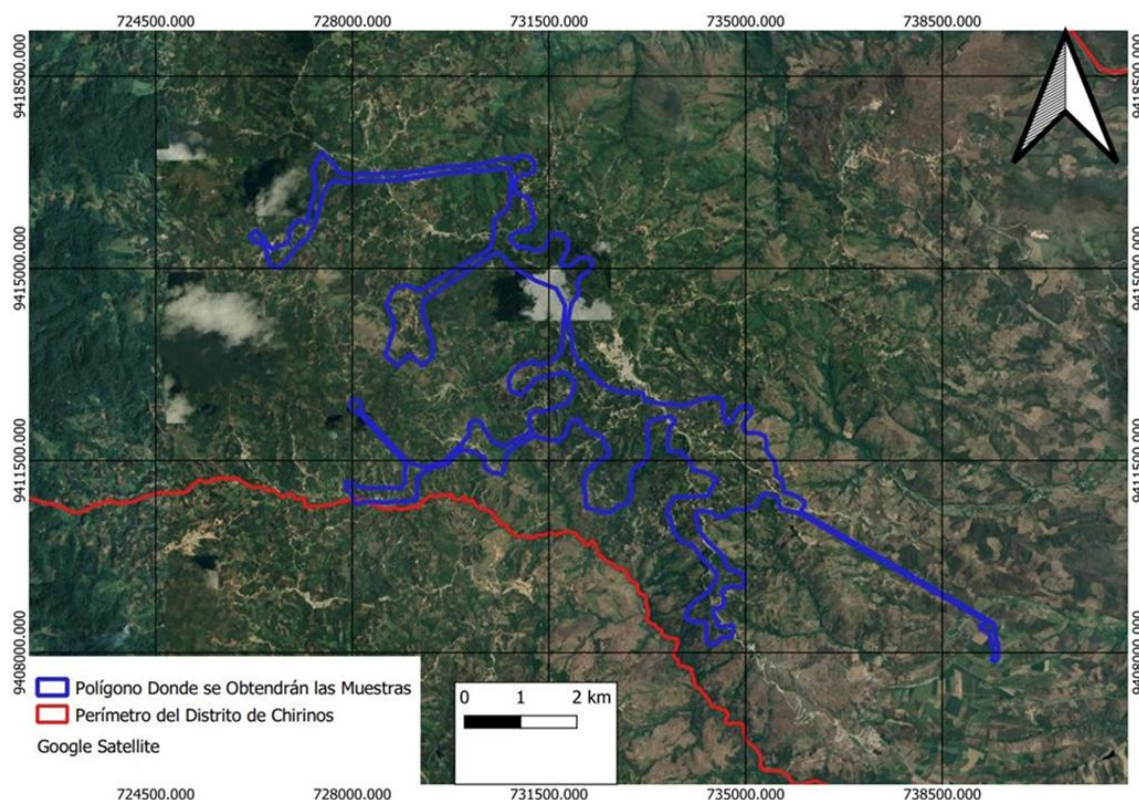


Figura 1. Mapa de Localización del Área de Estudio y Distribución de las 130 Parcelas de Café Orgánico, Chirinos, Cajamarca. Nota. En el perímetro que se muestra se ubican las parcelas y lugar de recolección de muestras de suelos. **Fuente:** Obtenido de Google Earth y usando QGIS.

Tabla 1

Variables analizadas, unidades de medida, profundidad de muestreo, número de observaciones y fuente de cada dato

Variable	Unidad de medida	Profundidad de muestreo	Número de observaciones	Fuente del dato
Materia orgánica	%	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
pH en agua	unidad pH	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
pH en KCl	unidad pH	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Conductividad eléctrica	dS/m	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Aluminio cambiante	meq/100 g	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Hidrógeno cambiante	meq/100 g	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Acidez intercambiable (Al + H)	meq/100 g	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Arena	%	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Limo	%	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Arcilla	%	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Clase textural	categoría	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Densidad aparente	g/cm ³	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Densidad real	g/cm ³	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Porosidad	%	0–30 cm	130	Análisis de laboratorio
Altitud	m s. n. m.	No aplica	130	GPS de campo
Pendiente	%	No aplica	130	Medición de campo
Coordenadas UTM (X,Y)	metros	No aplica	130	GPS de campo

Nota. Las muestras de suelo se recolectaron en la capa superficial (0–30 cm) mediante muestreo compuesto en parcelas cafetaleras orgánicas georreferenciadas del distrito de Chirinos, Cajamarca.

2.3. Georreferenciación y variables topográficas

En cada parcela se registraron coordenadas GPS en los vértices y la altitud para construir los polígonos prediales. La pendiente se midió en campo mediante un procedimiento geométrico directo, expresando el desnivel vertical como porcentaje de la distancia horizontal base de 100

cm; esta variable se incorporó al análisis por su influencia sobre la escorrentía, la erosión, el lavado de bases y la expresión espacial de la acidez. Todas las capas espaciales se organizaron en coordenadas UTM WGS84 zona 17S para mantener consistencia métrica durante la interpolación y la elaboración cartográfica.

2.4. Preparación de muestras

Las muestras se secaron al aire y luego en estufa a 40 °C, se trituraron y tamizaron con malla N.° 10 (2 mm), siguiendo los protocolos del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

2.5. Determinaciones físicas y químicas del suelo

Se determinaron clase textural, densidad aparente, densidad real, porosidad, color del suelo, pH en agua, pH en KCl, materia orgánica, nitrógeno total y acidez intercambiable expresada como Al, H y Al + H intercambiables, utilizando la metodología del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. La clase textural se expresó mediante los porcentajes de arena, limo y arcilla. Las variables químicas seleccionadas respondieron a su valor diagnóstico para el manejo agronómico del café orgánico en ladera, especialmente por su relación con fertilidad, acidez potencial, disponibilidad de nutrientes y calidad general del suelo. La densidad aparente, la densidad real y la porosidad se incorporaron como indicadores de condición física del suelo y de susceptibilidad relativa a compactación o restricciones a la aireación.

2.6. Gestión y depuración de la base de datos

Los datos cartográficos, de campo y de laboratorio se almacenaron y organizaron en QGIS Desktop 3.26.3, que se utilizó como entorno principal para integración espacial, visualización y análisis. De manera complementaria, se consolidaron hojas de cálculo para el control de calidad de la base de

datos y el análisis estadístico. Antes del análisis se verificaron rangos plausibles, valores atípicos, consistencia de unidades y duplicados, y se estandarizaron nombres de campos para asegurar la compatibilidad entre las tablas analíticas y la base espacial. También se derivó ΔpH como la diferencia entre pH en KCl y pH en agua, por su utilidad interpretativa en el análisis de acidez de reserva y comportamiento de cargas superficiales.

2.7. Análisis estadístico y geoestadístico

Se realizó estadística descriptiva (n, media, desviación estándar, mediana, mínimo y máximo) para todas las variables físicas, químicas y topográficas. Para explorar relaciones funcionales entre pares de variables de interés agronómico se ajustaron modelos polinómicos de segundo grado, evaluados mediante el coeficiente de determinación R^2 (Ferraz et al., 2019; Kouadio et al., 2018). Para la representación espacial se compararon IDW y kriging ordinario como método principal, dado que incorpora la dependencia espacial mediante semivariogramas ajustados a modelos esférico, exponencial y gaussiano (parámetros: nugget, sill y range). La calidad predictiva se evaluó mediante validación cruzada leave-one-out (LOOCV), calculando error medio (ME), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación de predicción R^2 (Li & Heap, 2011; Bazzi et al., 2017; da Silva et al., 2010a, 2010b). El resumen de métodos, modelos y métricas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Métodos de interpolación evaluados, modelos de semivariograma considerados y métricas de validación cruzada empleadas

Método de interpolación	Tipo de método	Modelos de semivariograma considerados	Parámetros principales evaluados	Métricas de validación cruzada
Ponderación inversa de la distancia (IDW)	Determinístico	No aplica	Potencia de ponderación (p), radio de búsqueda, número de vecinos	Error medio (ME), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE)
Kriging ordinario	Geoestadístico	Esférico, exponencial, gaussiano	Nugget, sill, rango (range), estructura de autocorrelación espacial	ME, MAE, RMSE, coeficiente de determinación de predicción (R^2)
Kriging universal	Geoestadístico con tendencia	Esférico, exponencial, gaussiano	Nugget, sill, rango, modelo de tendencia espacial	ME, MAE, RMSE, R^2
Kriging con validación cruzada (LOOCV)	Geoestadístico	Esférico, exponencial, gaussiano	Ajuste del semivariograma y optimización de parámetros	ME, MAE, RMSE, R^2

Nota. IDW = interpolación por distancia inversa ponderada; ME = error medio; MAE = error absoluto medio; RMSE = raíz del error cuadrático medio; R^2 = coeficiente de determinación de predicción. La validación cruzada se realizó mediante el procedimiento *leave-one-out cross-validation* (LOOCV), en el cual cada observación se predice utilizando el resto de los puntos de la base de datos.

2.8. Elaboración cartográfica

Los mapas temáticos se elaboraron en QGIS Desktop 3.26.3 a partir de la integración de la base de datos analítica, la delimitación de parcelas y las superficies interpoladas. Para cada variable principal se generaron capas con simbología graduada y clases agrónomicamente interpretables, manteniendo la referencia UTM

WGS84, la escala gráfica, la orientación norte y la leyenda correspondiente. La delimitación espacial de las parcelas se basó en la cartografía de vértices y polígonos construida durante el levantamiento de campo.

En la Figura 2 se esquematizan los procedimientos anteriormente explicados.



Figura 2. Esquema metodológico del flujo de trabajo desde el muestreo de suelo y georreferenciación hasta la interpolación espacial y la elaboración cartográfica.

Nota. El flujo metodológico integró la toma de muestras de suelo, la georreferenciación de parcelas, el análisis de laboratorio, la integración de datos en SIG, la interpolación espacial y la elaboración de mapas temáticos, con el fin de generar una base técnica para el análisis predial de la variabilidad del suelo en cafetales orgánicos de ladera.

3. Resultados y discusión

3.1. Variabilidad edáfica y topográfica del sistema cafetalero

El análisis de las 130 parcelas confirmó una marcada heterogeneidad edáfica y topográfica dentro del área de estudio (Tabla 3), lo que evidencia que el sistema cafetalero orgánico evaluado no puede tratarse como un conjunto

internamente homogéneo. Destacan la materia orgánica, con media de 16,79 % y rango de 5,00–33,00 %, y el aluminio cambiante, con mediana de 0,00 y máximo de 4,00 meq/100 g, lo que refleja presencia puntual pero relevante de acidez aluminica. La pendiente osciló entre 5 % y 68 % y la altitud entre 833 y 1902 m s. n. m., confirmando la complejidad fisiográfica del paisaje.

Tabla 3
Estadística descriptiva de las principales variables edáficas y topográficas

Variable	Unidad	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Materia orgánica	%	130	5,00	33,00	16,79	6,86
pH (agua)	unidad pH	130	3,90	6,80	5,21	0,62
pH (KCl)	unidad pH	130	3,50	6,30	4,83	0,64
Conductividad eléctrica	dS/m	130	0,18	0,85	0,37	0,12
Aluminio cambiante	meq/100 g	130	0,00	4,00	0,249	0,677
Arena	%	130	38,00	63,00	51,20	6,10
Limo	%	130	25,00	45,00	36,10	4,90
Arcilla	%	130	6,00	22,00	12,70	3,80
Densidad aparente	g/cm ³	130	0,997	1,422	1,242	0,083
Porosidad	%	130	42,00	61,00	52,30	4,70
Altitud	m s. n. m.	130	833	1902	1535,72	236,80
Pendiente	%	130	5	68	34,50	14,20

Nota. N = número de observaciones. Los estadísticos descriptivos corresponden a las parcelas cafetaleras orgánicas evaluadas en el distrito de Chirinos, Cajamarca.

Esta heterogeneidad no constituye un fenómeno accesorio, sino una condición estructural del sistema productivo: en cafetales de montaña tiene implicancias directas sobre fertilidad, acidez, disponibilidad de nutrientes y condición física del suelo (Figuerola-Saavedra et al., 2024). En consecuencia, el uso de promedios simples por parcela resulta insuficiente para orientar un manejo eficiente en condiciones de ladera. Comportamientos similares han sido reportados en cafetales de Brasil y Kenia mediante geoestadística (Burak et al., 2012; Mwendwa et al., 2022), respaldando la necesidad de diagnósticos espacialmente explícitos.

3.2. Relación entre materia orgánica y densidad aparente

La relación entre materia orgánica y densidad aparente se ajustó mediante un modelo polinómico de segundo grado, con la ecuación $y = 0,00004x^2 - 0,00966x + 1,39296$ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,4775$ (Figura 3). La tendencia observada mostró una disminución general de la densidad aparente conforme aumentó el contenido de materia orgánica, aunque con una respuesta no estrictamente lineal.

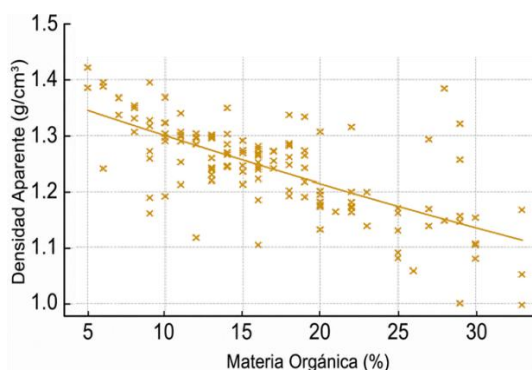


Figura 3. Relación polinómica entre materia orgánica (%) y densidad aparente (g/cm^3).

Nota. Relación polinómica ajustada entre materia orgánica (%) y densidad aparente (g/cm^3) en las parcelas evaluadas.

La asociación es consistente con el papel estructurante de la materia orgánica: mayores contenidos favorecen la agregación, mejoran la porosidad y reducen la compactación, reflejándose en menores valores de densidad aparente (Hossain et al., 2023). El valor intermedio del ajuste ($R^2 = 0,4775$) indica que la materia orgánica no explica por sí sola toda la variación observada, lo que sugiere la intervención simultánea de textura, humedad y posición topográfica, y reafirma la necesidad de integrar múltiples variables en la interpretación del sistema edáfico.

3.3. Relación entre pendiente y aluminio cambiante

El ajuste polinómico entre pendiente y aluminio cambiante produjo la ecuación $y = 0,00077x^2 - 0,04530x + 0,49685$, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,7055$ (Figura 4). La forma de la curva evidenció una asociación no lineal entre ambas variables, con incremento del aluminio cambiante hacia valores más altos de pendiente.

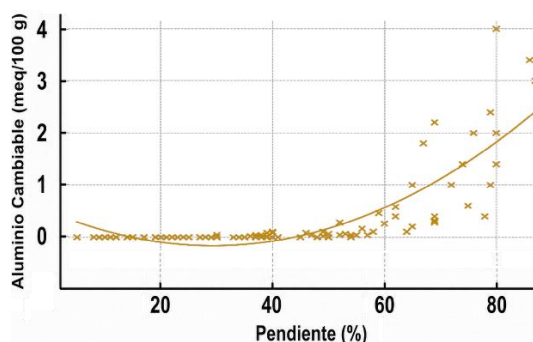


Figura 4. Relación polinómica entre pendiente (%) y aluminio cambiante (meq/100 g).

Nota. Relación ajustada entre pendiente del terreno y aluminio cambiante en las parcelas evaluadas.

Este hallazgo reviste importancia agronómica porque muestra que la topografía no actúa únicamente como contexto geomorfológico, sino como condicionante activo de la química del suelo. En ambientes de ladera, la mayor pendiente favorece la escorrentía, la pérdida de bases y la acidificación diferencial, lo que puede intensificar la presencia de aluminio cambiante en sectores específicos (Wang et al., 2024). En términos de manejo, este patrón refuerza la necesidad de focalizar las estrategias de corrección de acidez en los sectores topográficamente más exigentes. Quispe et al. (2025) demostraron la utilidad del análisis espacial para orientar decisiones de encalado y fertilización sitio-específica en zonas cafetaleras del Perú, confirmando la aplicabilidad del enfoque aquí presentado.

3.4. Desempeño de los métodos de interpolación

La validación cruzada leave-one-out indicó que el kriging ordinario produjo superficies más coherentes que IDW al incorporar la autocorrelación espacial mediante semivariogramas esférico, exponencial y gaussiano (Li & Heap, 2011; Bazzi et al., 2017). Por ello se adoptó como método principal para los mapas temáticos, mientras que IDW se utilizó como referencia comparativa en las fracciones texturales y fisicoquímicas. La utilidad

del kriging no radicó solo en producir mapas continuos, sino en permitir una lectura espacial coherente de la variabilidad edáfica a escala predial, útil para reducir la complejidad del sistema y orientar decisiones agronómicas diferenciadas (Silva et al., 2024).

3.5. Distribución espacial de la materia orgánica

La cartografía de materia orgánica mostró una distribución claramente heterogénea, con sectores de mayor acumulación y otros con menores contenidos, organizados espacialmente dentro del área de estudio (Figura 5). Este patrón sugiere diferencias locales en reciclaje de biomasa, cobertura del suelo, intensidad de manejo y estabilidad de los procesos de descomposición. Desde una perspectiva agronómica, el mapa permite distinguir sectores donde el manejo orgánico favorece la acumulación de materia orgánica, frente a otros donde sería necesario reforzar estrategias de

cobertura o ajustar el arreglo agroforestal. Este comportamiento es coherente con la literatura que reconoce que la acumulación de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros no se distribuye homogéneamente, sino que depende del contexto ambiental y del manejo local (Omon et al., 2025). Por ello, la materia orgánica debe entenderse no solo como indicador de fertilidad, sino como criterio espacial para la priorización de intervenciones.

3.6. Distribución espacial del aluminio cambiante

La cartografía del aluminio cambiante mostró una distribución espacial concentrada y no uniforme, con áreas donde la variable fue prácticamente nula y otras donde alcanzó valores considerablemente más altos (Figura 6). Esta configuración confirma que la restricción química asociada a la acidez no se expresa de manera homogénea, sino que se concentra en determinados sectores del paisaje.

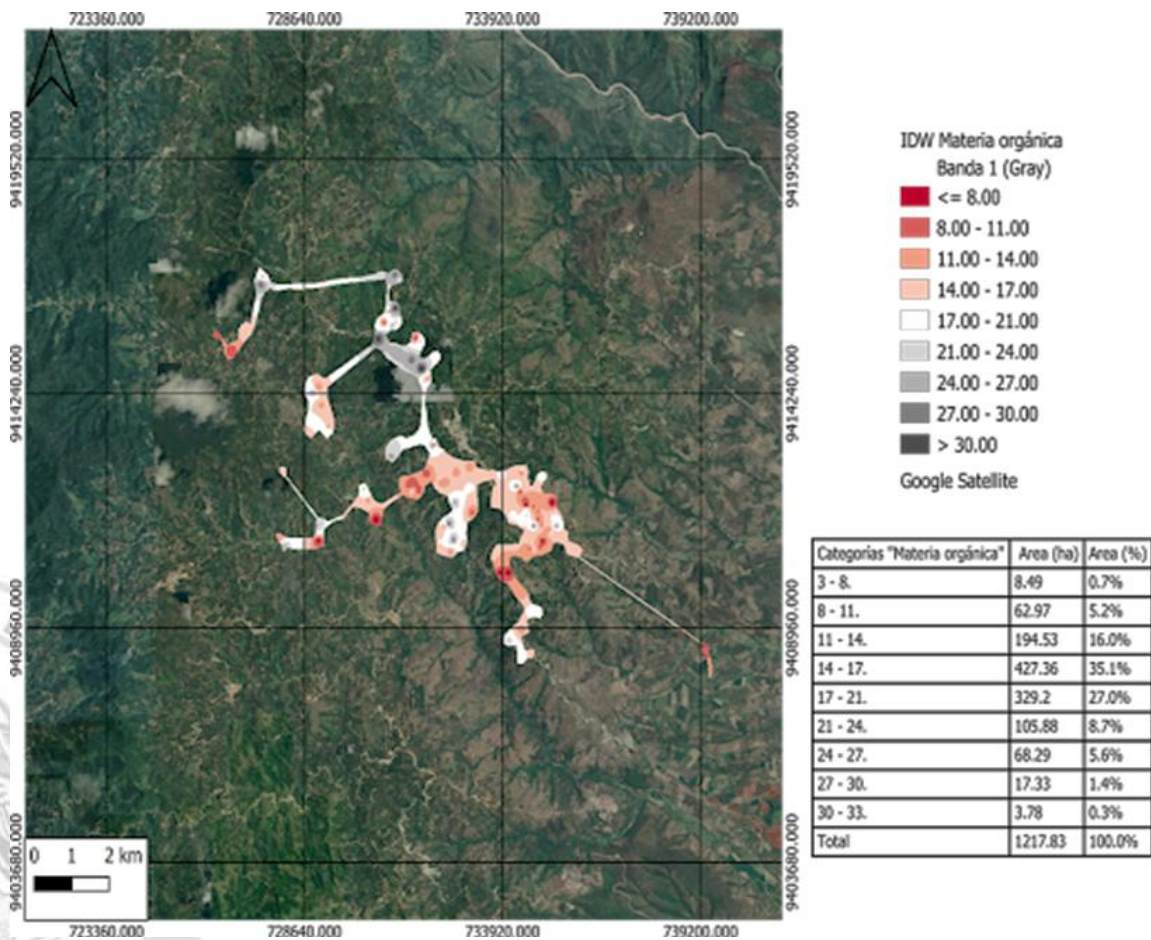


Figura 5. Distribución espacial de la materia orgánica del suelo mediante kriging ordinario.

Nota. Modelo de distribución espacial del contenido de materia orgánica en el área de estudio, generado mediante kriging ordinario sobre un mapa base de Google Satellite. La superficie total analizada abarca 1217.83 hectáreas, destacando una predominancia de valores medios entre 14 y 21.

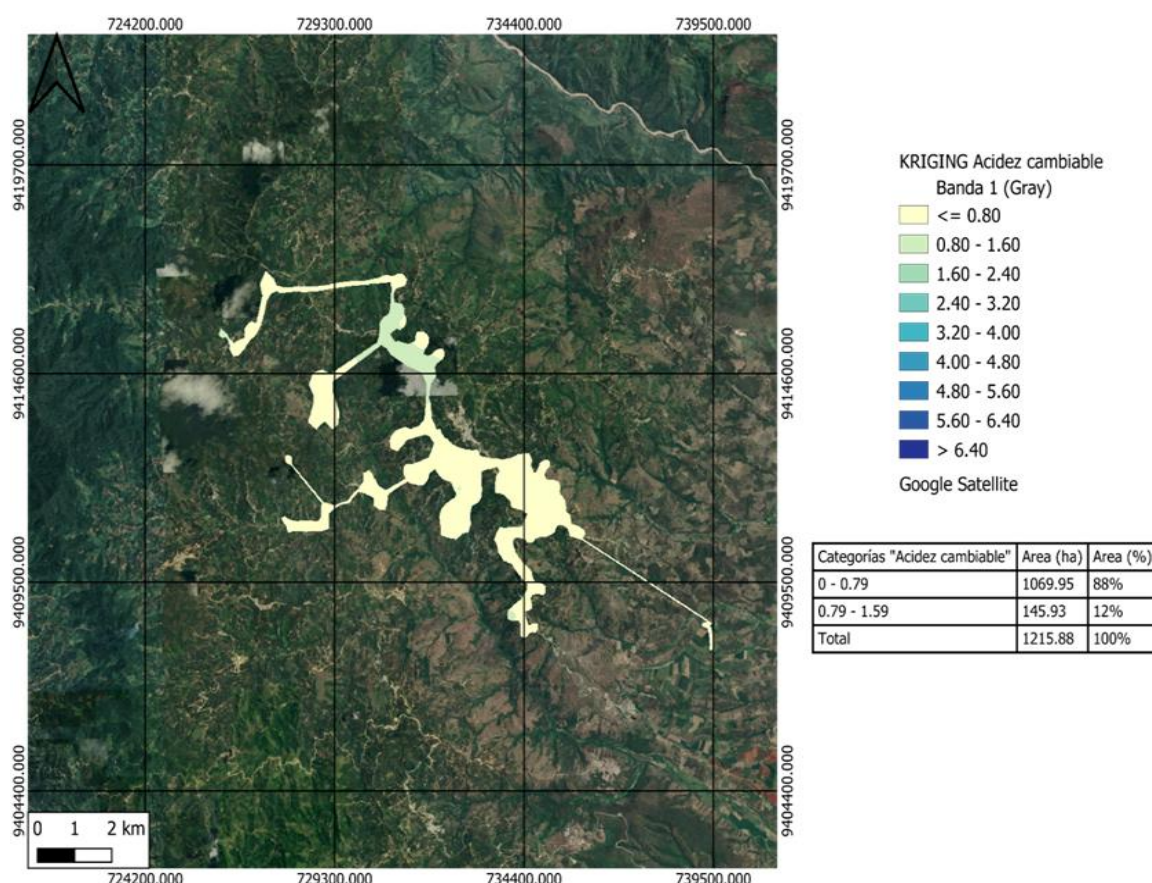


Figura 6. Distribución espacial del aluminio cambiante (meq/100 g) mediante kriging ordinario.

Nota. Interpolación por Kriging Ordinario a partir de puntos de muestreo georreferenciados de aluminio cambiante (meq/100 g). Sistema de coordenadas UTM. Distribución espacial del aluminio cambiante obtenida mediante kriging ordinario a partir de puntos de muestreo georreferenciados. La superficie interpolada permite identificar sectores con mayor restricción química asociada a la acidez del suelo. Fondo satelital de referencia. Barra de escala, norte y retícula UTM incluidos.

Los sectores con mayor concentración de aluminio cambiante constituyen zonas prioritarias para la corrección localizada de acidez. Este resultado confirma que la acidez del suelo en cafetales de montaña está espacialmente estructurada por el relieve, y que identificar la localización precisa de estas restricciones es indispensable para un manejo predial eficaz.

3.7. Distribución espacial de la conductividad eléctrica y de las fracciones texturales

Las fracciones texturales mostraron una distribución relativamente homogénea: arena entre 46% y 55% en el 72% del área, arcilla entre 8% y 15% en el 65% del área, y limo entre 33 % y 40% en el 80% del área (Figura 7). En conjunto, estos rangos son coherentes con texturas franco-arenosas a franco-limosas, una condición de drenaje relativamente favorable y contrastes moderados en retención de agua y nutrientes. La distribución espacial de las fracciones texturales (Figura 7) refuerza que la variabilidad del sistema incluye componentes físicos que condicionan la

fertilidad, la aireación y la disponibilidad hídrica, complementando la interpretación de la materia orgánica y del aluminio cambiante.

3.8. Implicancias agronómicas, limitaciones y aporte del estudio

En conjunto, los resultados confirman que la heterogeneidad interna del sistema cafetalero orgánico evaluado justifica un manejo espacialmente diferenciado. La principal contribución consiste en transformar observaciones puntuales de suelo y relieve en una base cartográfica útil para la toma de decisiones prediales, desplazando el enfoque desde la parcela promedio hacia la lectura espacial de propiedades como la materia orgánica, la acidez y la textura del suelo. La integración de análisis de laboratorio, variables topográficas y cartografía geoestadística demuestra que las herramientas de agricultura de precisión son adaptables a sistemas de pequeña producción orgánica en los Andes (Arévalo-Luna et al., 2020; Figueroa-Saavedra et al., 2024).

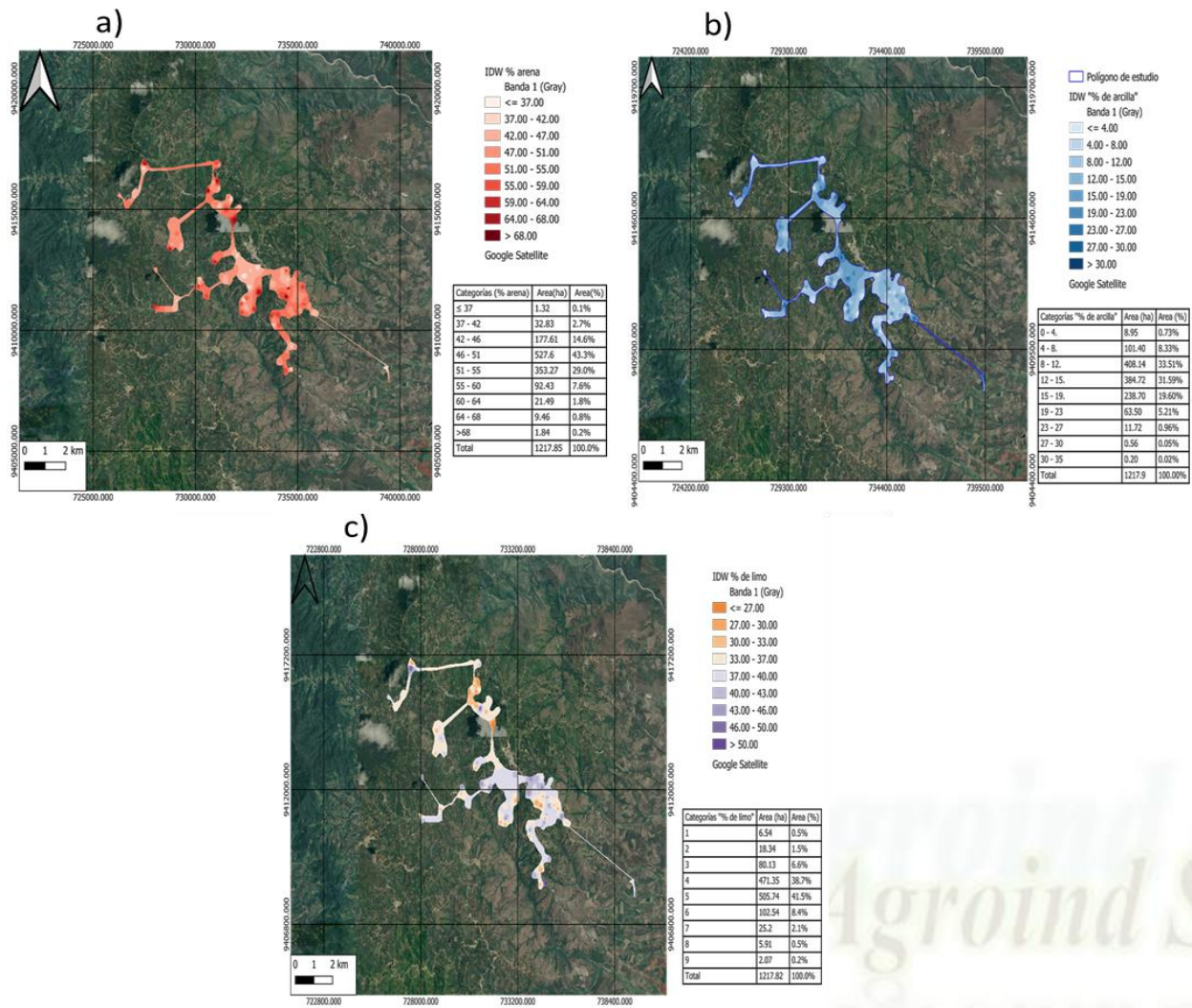


Figura 7. Distribución espacial de las fracciones texturales del suelo (IDW): a) arena, b) arcilla, c) limo.

Nota. Distribución espacial de las fracciones texturales del suelo generada mediante IDW. Panel a) porcentaje de arena: predominio de suelos con 46%-55% (72,3% del área); panel b) porcentaje de arcilla: predominio de 8%-15% (65% del área); panel c) porcentaje de limo: predominio de 33%-40% (80% del área). Superficie total interpolada: 1217,85 ha.

Entre las limitaciones, el análisis se restringió a la capa superficial del suelo y a un contexto territorial específico, por lo que la extrapolación a otros sistemas debe realizarse con cautela. No obstante, estas limitaciones delimitan el alcance sin invalidar el aporte principal, y abren líneas para futuras investigaciones con mayor profundidad de muestreo, monitoreo temporal y validación productiva.

4. Conclusiones

El estudio evidenció una variabilidad espacial significativa de las propiedades edáficas y topográficas en los cafetales orgánicos de Chirinos a escala predial. La integración de análisis físico-químicos del suelo, variables topográficas y SIG permitió identificar patrones diferenciados en materia orgánica, densidad aparente, acidez y textura. La materia orgánica

mostró una relación inversa con la densidad aparente ($R^2 = 0,4775$), confirmando su papel en la calidad física del suelo; mientras que la pendiente evidenció una asociación positiva con el aluminio cambiante ($R^2 = 0,7055$), indicando que el relieve condiciona la expresión espacial de las restricciones químicas en sistemas cafetaleros de montaña.

La cartografía temática generada permite identificar sectores con mayor acumulación de materia orgánica y áreas con mayor expresión de acidez, demostrando la utilidad de la geoestadística para apoyar el diagnóstico agronómico a escala predial.

El estudio aporta una base metodológica reproducible para el análisis predial del suelo en sistemas cafetaleros andinos, con potencial de aplicación en contextos de pequeña producción orgánica de montaña.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Cooperativa Cafetalera La Prosperidad de Chirinos por el acceso a las parcelas y la información de campo, y al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNPRG por el apoyo técnico en el análisis de muestras.

Financiamiento

El presente estudio fue realizado con recursos propios de los investigadores y no contó con financiamiento externo de ninguna institución pública o privada.

Declaración de Conflictos de Interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés que hayan podido influir en los resultados o interpretaciones del presente artículo científico.

Disponibilidad de Datos y Materiales

Los datos de suelo, coordenadas de parcelas y scripts de procesamiento (QGIS y R) serán depositados en el repositorio institucional de la UNPRG bajo licencia CC BY-NC-SA, disponibles para la comunidad científica bajo solicitud justificada.

Contribución de Autoría

Conceptualización, Metodología e Investigación (DSD y HJC); Adquisición de Datos y Análisis Formal (HJC); Supervisión y Administración del Proyecto (ERC); Redacción-borrador original (DSD y HJC); Redacción-revisión y edición (JWGC).

Uso Responsable de IA

Para la corrección de estilo y revisión gramatical se emplearon herramientas de inteligencia artificial generativa. Los autores confirman que el contenido científico, la metodología, el análisis de datos y las conclusiones fueron generados, validados y verificados por el equipo de investigación, manteniendo el control intelectual y la responsabilidad científica del trabajo.

Referencias bibliográficas

- Arévalo-Luna, O. J., Vásquez-Ruiz, J. M., & Chávarry-Rodríguez, J. E. (2020). Land suitability for coffee (*Coffea arabica*) growing in Amazonas, Peru: Integrated use of AHP, GIS and RS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 673. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110673>
- Bazzi, C. L., Uribe-Opazo, M. A., Liska, G. R., & Rocha, W. D. (2017). Methodology to determine the soil sampling grid for precision agriculture in a coffee field. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41, e0160057. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160057>
- Burak, D. L., Passos, R. R., & Vaz Andrade, F. V. (2012). Spatial variability of soil chemical attributes in Conilon coffee plantation: Relationships with soil texture, organic matter and relief. *Bragantia*, 71(4), 538-547. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012000400012>
- da Silva, A. F., de Souza Lima, J. S., & de Oliveira, R. B. (2010b). Methods of interpolation for estimating the pH in soil under two management systems of Arabica coffee. *Idesia*, 28(2), 61-66.
- da Silva, A. F., de Souza Lima, J. S., de Souza, G. S., & de Oliveira, R. B. (2010a). Spatial variability of soil chemical attributes in arabica coffee (*Coffea arabica* L.) fields under different management systems. *Coffee Science*, 5(2), 173-182.
- Ferraz, G. A., Ferraz, P. F. P., Martins, F. B. S., da Silva, F. M., Damasceno, F. A., & Barbari, M. (2019). Principal components in the study of soil and plant properties in precision coffee farming. *Agronomy Research*, 17(2), 418-429. <https://doi.org/10.15159/AR.19.114>
- Figueroa-Saavedra, H. F., Barbaru-Grajales, A. D., Zapata-Mayorga, H. A., Herrera-Ocaña, H. R., & Moya, W. (2024). Physio-edaphoclimatic factors show optimal soil suitability for three tropical crops in the Ecuadorian Amazon. *Scientia Agricola*, 81, e20220214. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0214>
- Hossain, M. Z., Islam, M. M., Hoque, T. S., & Islam, M. S. (2023). Soil organic matter and its relationship with physical and chemical properties in different land uses. *Sustainability*, 15(2), 1640. <https://doi.org/10.3390/su15021640>
- Kouadio, A. L., Deo, R. C., Byrareddy, V. M., Adamowski, J. F., Mushtaq, S., & Phuong Nguyen, V. (2018). Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 324-338. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.014>
- Lense, G. H. E., Parreiras, T. C., Servidoni, L. E., & Mincato, R. L. (2022). Impacts of reforestation on soil and soil organic carbon losses. *Ciencia e Agrotecnologia*, 46, e002622. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246002622>
- Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3-4), 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>
- Liu, X., Tan, Y., Dong, J., Wu, J., Wang, X., & Sun, Z. (2025). Assessing habitat selection parameters of Arabica coffee using BWM and BCM methods based on GIS. *Scientific Reports*, 15(1), 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84073-0>
- Mwendwa, S. M., Mbuvi, J. P., Kironchi, G., & Gachene, C. K. K. (2022). Assessing spatial variability of selected soil properties in Upper Kabete Campus coffee farm, University of Nairobi, Kenya. *Heliyon*, 8(8), e010190. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e010190>
- Nigussie, W., Al-Najjar, H. A., Zhang, W. C., Yirsaw, E., Nega, W., & Zhang, Z. (2024). Enhancing coffee agroforestry systems suitability using geospatial analysis and Sentinel satellite data in Gedeo Zone, Ethiopia. *Sensors*, 24(19), 6287. <https://doi.org/10.3390/s24196287>
- Omon, E. A., Abiodun, B. J., & Olaiya, O. B. (2025). A global meta-analysis of soil carbon stock in agroforestry coffee cultivation. *Agronomy*, 15(2), 480. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020480>
- Quispe, K. R., Hermosa, N., Mejía, S., Romero-Chavez, L. E., Ottos, E., Arce, A., & Solórzano Acosta, R. A. (2025). Spatial analysis of soil acidity and available phosphorus in coffee-growing areas of Pichanaqui: Implications for liming and site-specific fertilization. *Agriculture (Switzerland)*, 15(15), 1632. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151632>
- Sadeghi, S., Gizachew, B., Yadeta, B., & Tulu, B. (2025). GIS and parametric based coffee site suitability zonation in North Shewa zone of Oromia region, central Ethiopia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 25, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100674>
- Silva, C. D. O. F., Grego, C. R., Manzione, R. L., Oliveira, S. R. D. M., Rodrigues, G. C., & Rodrigues, C. A. G. (2024). Summarizing soil chemical variables into homogeneous management zones – case study in a specialty coffee crop. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100418. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100418>
- Wang, S., Liu, Q., Liu, Z., Chen, W., Zhao, X., Zhang, J., Bao, L., & Zhang, N. (2024). Distribution and soil threshold of selenium in the cropland of southwest mountainous areas in China. *Scientific Reports*, 14, 67450. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67450-7>