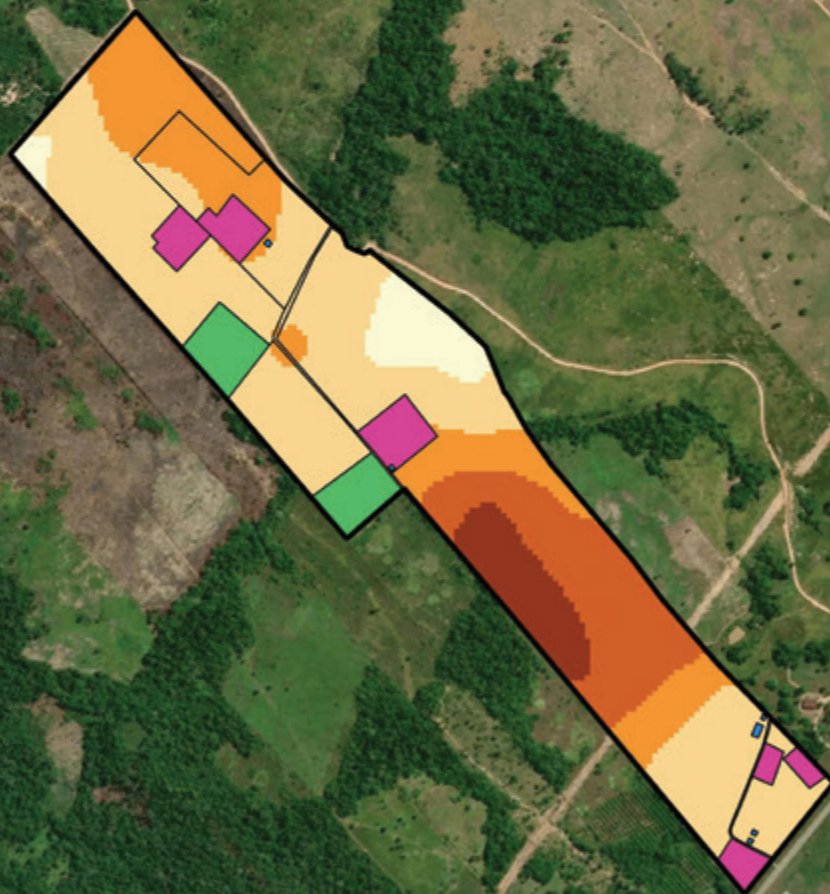


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Pucallpa



PERÚ

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria





MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESTRATÉGICOS AGRARIOS

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Pucallpa



PERÚ Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA PUCALLPA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Angel Manuel Manero Campos

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Agosto, 2025

Publicado:

Agosto, 2025

Disponible en:

<https://repositorio.inia.gob.pe/>

ISBN:

978-9972-44-196-7

Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

www.gob.pe/inia

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: comite_publicaciones@inia.gob.pe

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2025-08873

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rigel A. Llerena-Arroyo, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor Andrés Ramírez-Maguiña / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| Presentación | 7 |
| 1. Introducción | 9 |
| 2. Principios fundamentales del análisis de suelos | 11 |
| 2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos | 11 |
| 2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas | 11 |
| 2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes | 14 |
| 2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes | 21 |
| 2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo | 23 |
| 3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Pucallpa | 25 |
| 3.1. Ubicación de la EEA Pucallpa | 25 |
| 3.2. Muestreo estratificado del suelo | 26 |
| 3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo | 27 |
| 3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados | 28 |
| 3.3. Análisis de suelos | 29 |
| 3.4. Resultados de los análisis de suelos | 30 |
| 3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo | 31 |
| 3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran | 32 |
| 3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos | 33 |
| 3.7.1. Generación y ajuste del variograma | 33 |
| 3.7.2. Interpolación <i>kriging</i> | 33 |
| 3.7.3. Validación cruzada | 33 |
| 3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo | 35 |
| 4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Pucallpa | 41 |
| 4.1. Índice de saturación de bases catiónicas | 41 |
| 4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles | 45 |
| 4.3. El pH del suelo | 45 |
| 5. Referencias bibliográficas | 49 |



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia tecnológica, aprovechamiento y conservación de los recursos genéticos y producción de semillas, plantones y reproductores de alto valor genético.

El INIA, a través de la Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios (DSEA), viene ejecutando el proyecto de inversión “Mejoramiento de los servicios de investigación y transferencia tecnológica en el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados y aguas para riego en la pequeña y mediana agricultura en los departamentos de Lima, Áncash, San Martín, Cajamarca, Lambayeque, Junín, Ayacucho, Arequipa, Puno y Ucayali”, con CUI N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

La Estación Experimental Agraria (EEA) Pucallpa, ubicada en Ucayali, ofrece un espacio representativo para analizar las propiedades del suelo en una zona con características ambientales complejas. Los resultados obtenidos de los análisis de suelos en esta estación permiten una mejor comprensión de la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la región.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Pucallpa”, sistematiza los resultados del muestreo, análisis e interpretación de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. Esta publicación está dirigida a profesionales del sector agrario e investigadores interesados en mejorar la salud de los suelos.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación del suelo en la región tropical es una de las mayores amenazas para la sostenibilidad de las actividades agrícolas y la producción de alimentos. Este problema se agrava debido a prácticas agrícolas inadecuadas (de Valença et al., 2017), como el sistema de tumba y quema de bosques primarios, ampliamente utilizado en estas zonas (Alegre et al., 1990). Asimismo, la intensificación del cambio climático exacerba este fenómeno (Coaguila et al., 2025; Correa et al., 2016). El escenario es especialmente crítico en áreas con suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), donde la baja fertilidad natural limita severamente la productividad agrícola (Fageria y Nascente, 2014). Por ello, el monitoreo de la fertilidad del suelo es una actividad indispensable para la planificación y gestión sostenible de la producción de cultivos, y la corrección oportuna de las deficiencias o excedentes en los parámetros edáficos.

En este contexto, la falta de herramientas técnicas que permitan la interpretación espacial precisa de las propiedades fisicoquímicas del suelo limita la toma de decisiones en el manejo de la fertilización de los cultivos. Ante esta situación, se dispone de herramientas modernas como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de variogramas. Estas técnicas permiten diseñar estrategias de fertilización diferenciadas por zonas, lo cual permite mejorar la eficiencia del uso de insumos y conservar la salud del suelo a largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

El presente documento tiene como objetivo integrar la interpretación y el análisis geoestadístico de las propiedades físico-químicas del suelo en la EEA Pucallpa, así como presentar mapas de variabilidad espacial que orienten la aplicación de enmiendas y fertilizantes para corregir desequilibrios nutricionales, y promover la mejora de la fertilidad química del suelo.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante el análisis químico de suelos implica varios pasos discretos, pero en cierta medida interrelacionados. Estos pasos incluyen: el muestreo de suelos, el análisis químico, la interpretación de los resultados analíticos y el desarrollo de recomendaciones. Si bien las metodologías y los procedimientos utilizados para realizar cada uno de estos pasos pueden afectar la naturaleza de la recomendación final, parece que las amplias discrepancias en las recomendaciones de fertilizantes desarrolladas por diferentes laboratorios que operan en una región se deben, en la mayoría de los casos, a diferentes técnicas de interpretación.

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El Índice de saturación de bases catiónicas (BCSR, por sus siglas en inglés) es un enfoque ampliamente estudiado en la ciencia del suelo para evaluar la fertilidad edáfica en función del equilibrio relativo de cationes básicos intercambiables en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y posteriormente desarrollada en sistemas agronómicos modernos, postula que existen proporciones óptimas entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), que maximizan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2024). También se ha estudiado las variaciones entre las proporciones óptimas en función de la mineralogía del suelo y los requerimientos de los cultivos (Kopittke y Menzies, 2007). Sin embargo, estudios recientes han cuestionado la universalidad del BCSR, señalando que los sistemas basados en suficiencia de nutrientes (SLAN) pueden ser más relevantes en ciertos contextos edáficos (Brock et al., 2021). En este sentido, esta sección examina la aplicabilidad del BCSR en los suelos de la EEA Pucallpa del INIA.

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de índice de saturación de bases catiónicas (BCSR) tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis argumenta que una desviación de los valores óptimos de las proporciones catiónicas en la solución del suelo, limita la absorción de nutrientes y perjudica la salud de los cultivos, debido a que un desequilibrio entre los iones en solución afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes del suelo. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1. Se considera que sólo una pequeña fracción de los nutrientes que requieren las plantas se encuentran en la solución suelo o en alguna forma reactiva. Además, este esquema sostiene que cada mecanismo es un reservorio iónico.

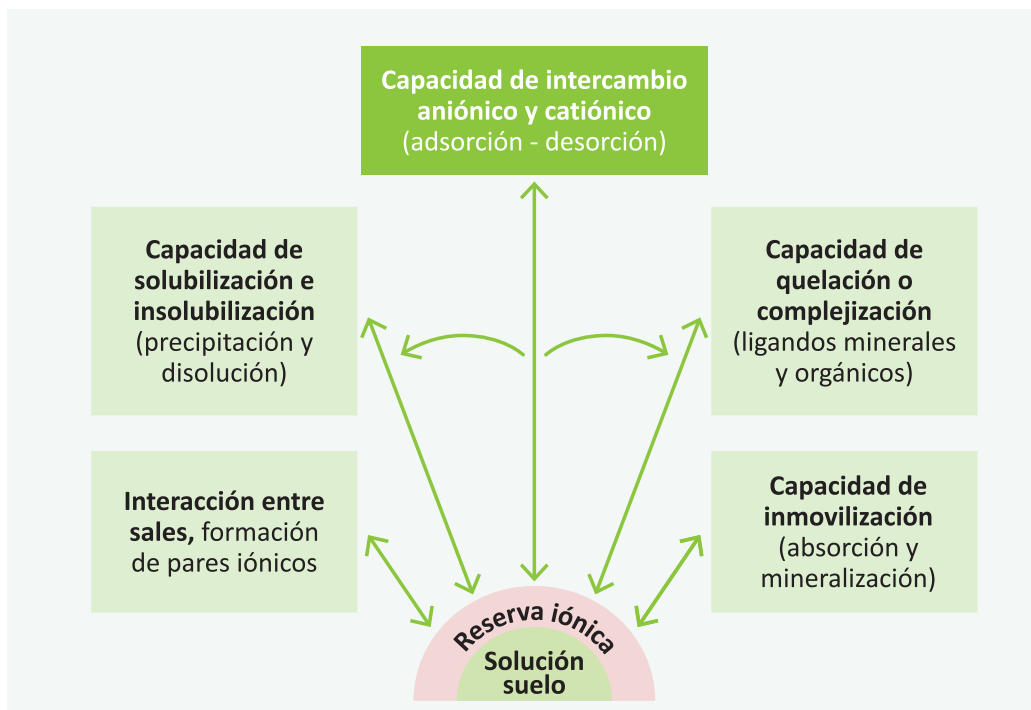


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Bear et al. (1945), con base en estudios en suelos agrícolas de Nueva Jersey, proporcionaron evidencia empírica que respaldó parcialmente la hipótesis de Albrecht. Según las investigaciones clásicas de Bear et al. (1945) y posteriormente sustentadas por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), la saturación óptima en suelos con alta CIC, debería distribuirse aproximadamente en 65-75 % de Ca^{2+} , 10-15 % de Mg^{2+} , 3-7 % de K^+ y menos del 5 % de Na^+ , mientras que el hidrógeno (H^+) y el aluminio (Al^{3+}) deberían mantener niveles suficientemente bajos, menores a 15 %, para evitar su toxicidad en suelos ácidos. A partir de estos hallazgos, se promovió el BCSR como un criterio para la formulación de programas de fertilización y enmiendas de suelos (Zhang, 1999).

En décadas recientes, diferentes investigaciones han comparado la efectividad del BCSR con el Sistema de Suficiencia de Nutrientes (SLAN), evidenciando que en muchos casos la disponibilidad absoluta de nutrientes es un mejor predictor del rendimiento de los cultivos que la proporción relativa de cationes (Brock et al., 2021). Sin embargo, en suelos con alta CIC ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, altos niveles de lixiviación o desbalances extremos de bases, el BCSR sigue siendo una herramienta útil para el diagnóstico de fertilidad y la corrección de desequilibrios iónicos.

El pH del suelo es una de las variables más importantes, que complementan la toma de decisiones en las prácticas agronómicas, para corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si es necesaria la aplicación de cal o yeso agrícola, para corregir desbalances iónicos por exceso de Al^{3+} y Na^+ , respectivamente. Ambos insumos presentan alto contenido de calcio (Ca), y son las principales para aumentar los porcentajes de saturación de Ca^{2+} y disminuir los de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso tienen posibles impactos positivos y negativos en las propiedades del suelo y la producción vegetal, debido a tres mecanismos principales: aumento del pH, aumento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se muestran en Figura 2.

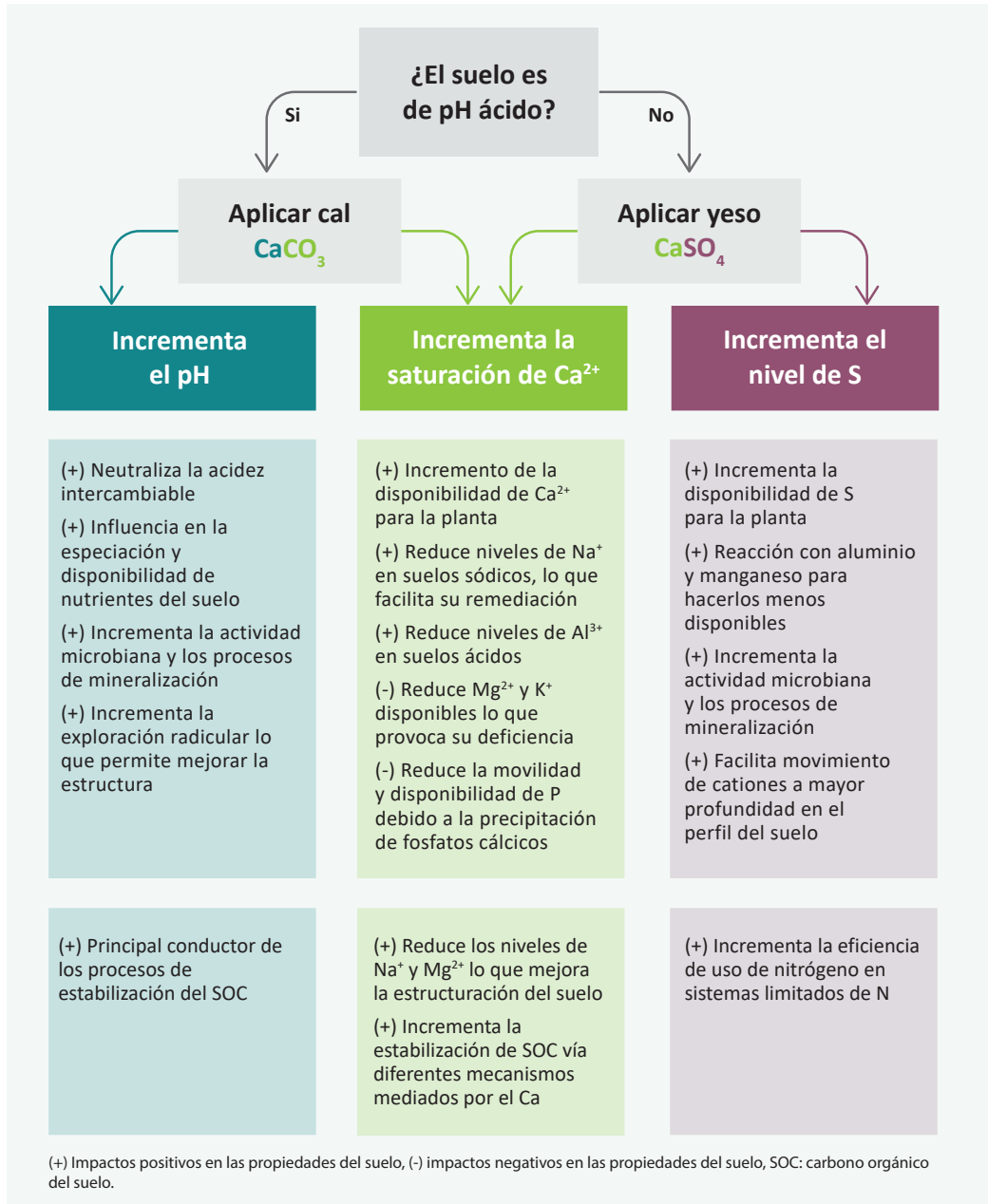


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El concepto de Sistema de Suficiencia de Nutrientes (SLAN, por sus siglas en inglés) se basa en una expresión matemática general de la ley de rendimientos decrecientes, según la cual el aumento del rendimiento de un cultivo por unidad de nutriente disponible disminuye a medida que el nivel de nutriente disponible se acerca al nivel de suficiencia o umbral crítico (McLean, 1977). Esta teoría, aunque presenta sustento científico, también ha sido criticada debido a que no contempla la interacción entre nutrientes y los problemas estructurales del suelo. Sin embargo, es una herramienta fundamental para la interpretación del análisis de suelos. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos, que se describen en la Figura 3.

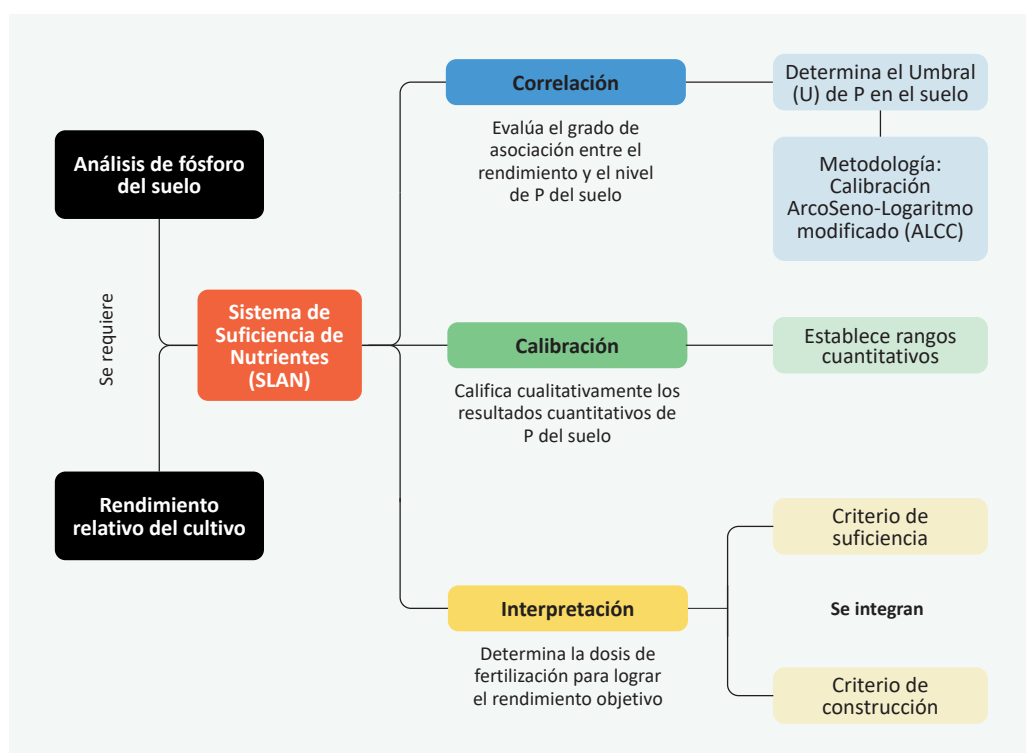


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

Para los cálculos de la interpretación de resultados de los análisis de suelos, se puede hacer uso de 3 criterios: criterio de suficiencia, mantenimiento y construcción. La selección del criterio adecuado depende del nivel de contenido del nutriente disponible en el suelo (alto, medio-bajo, o muy bajo), ya que este define el objetivo agronómico y el enfoque de fertilización (Marino y Echeverría, 2018).

Además, este procedimiento requiere previamente de la determinación de la eficiencia de remoción de nutrientes, necesario para obtener una tonelada de producción. Así como, la estimación de la dosis requerida para incrementar 1 mg del nutriente por 1 kg de suelo, esto con el objetivo de establecer dosis de fertilización que integren los criterios de suficiencia y construcción.

b. Aplicación del criterio de suficiencia

El criterio de suficiencia se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido alto de nutrientes, cercano al umbral crítico; su uso considera únicamente la reposición del nutriente extraído por el cultivo, dado que se encuentra en forma fácilmente disponible (García y Ciampitti, 2010).

Este criterio usa la relación entre el rendimiento relativo (RR), el cual es calculado mediante la fórmula 1, y los niveles de macro y micronutrientes disponibles en el suelo, para fertilizar sólo las necesidades nutricionales del cultivo en condiciones de niveles altos del nutriente en el suelo. El sustento teórico se basa en la Ley del mínimo de Liebig, que indica que el crecimiento de un cultivo está limitado por el nutriente presente en menor cantidad relativa, por debajo del umbral crítico en el suelo (Bray, 1958). Este criterio, considera la eficiencia agronómica del nutriente, es decir, busca maximizar el rendimiento económico de la fertilización.

$$RR = \left(\frac{\text{Rendimiento alcanzado}}{\text{Rendimiento potencial}} \right) \times 100 \quad \dots(1)$$

A continuación, se presenta un ejemplo práctico para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de café, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de café, y se obtuvo 15 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Bray y Kurtz (P-Bray).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 15 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 70 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 15 mg de P-Bray por kg de suelo utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{RR \times \text{Rendimiento potencial}}{100} \quad \dots(2)$$

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{0.60 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1.2 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 70 % del potencial, 1.2 t ha⁻¹ en lugar de 2 t ha⁻¹.

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 1.2 \text{ t ha}^{-1} = 0.42 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 1.2 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 0.42 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4:

$$\text{Rendimiento objetivo} = \text{Incremento de raíces y brotes} + \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(4)$$

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.42 + 1.2 = 1.62 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 5.18 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = \text{Extracción de P} \times \text{Rendimiento objetivo} \quad \dots(5)$$

$$\text{Requerimiento de P} = 5.18 \times 1.62 = 8.39 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 8.39 kg de P para alcanzar un rendimiento objetivo de 1.62 t ha⁻¹, el cual está conformado por 0.42 t ha⁻¹ de raíces, y 1.2 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación del criterio de mantenimiento y construcción

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido medio-bajo de nutrientes. Además de tener el objetivo de reponer o mantener la cantidad de nutriente extraído por el cultivo, se realiza el ajuste por eficiencia de su uso, para compensar las pérdidas por fijación y adsorción (Buresh et al., 1997).

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplican cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, en el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

Los criterios de mantenimiento y construcción integran conceptos modernos de mejora de la fertilidad del suelo a largo plazo. Este enfoque integrado busca incrementar progresivamente la concentración de nutrientes en el suelo mediante aplicaciones superiores a las necesidades del cultivo, hasta alcanzar un umbral óptimo determinado mediante estudios de calibración de respuesta agronómica (Marino y Echeverría, 2018). Esto es particularmente relevante en suelos con niveles medios y bajos de nutrientes disponibles o con alta capacidad de adsorción, donde la saturación gradual de los sitios de intercambio permite reducir la fijación de elementos esenciales como el fósforo (P) y el potasio (K), y así mejorar su disponibilidad en ciclos de producción posteriores (Barber, 1995; Havlin et al., 2016).

La selección del criterio adecuado depende de factores como la mineralogía del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la dinámica de adsorción-desorción, la eficiencia de uso de los fertilizantes, y la respuesta en el cultivo; siendo el criterio de construcción el más apropiado en sistemas de suelos empobrecidos (Havlin et al., 2016). En términos aplicativos, su uso se basa en la estimación de la demanda del suelo para incrementar el nivel del nutriente a largo plazo.

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos con el cultivo de café para la aplicación del criterio de mantenimiento, y criterio de mantenimiento y construcción.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de café, y se obtuvo 10 mg de P-Bray por kg de suelo utilizando el método de Bray y Kurtz (P-Bray), el cual se considera un nivel medio.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 10 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0.8 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 0.8 \text{ t ha}^{-1} = 0.28 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.8 \text{ t ha}^{-1} + 0.28 \text{ t ha}^{-1} = 1.08 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto Paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 5.18 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 5.18 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1.08 \text{ t ha}^{-1} = 5.59 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: finalmente, determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{\text{Requerimiento de P}}{\text{Eficiencia de uso de P}} \quad \dots(6)$$

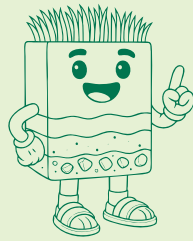
$$\text{RM de P} = \frac{5.59}{0.3} = 18.63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de P en el cultivo de café es 18.63 kg ha⁻¹.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de café, y se obtuvo 5 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Bray y Kurtz (P-Bray), el cual se considera un nivel muy bajo.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 20 %.



Nota:

El criterio de construcción es un enfoque que propone la fertilización para incrementar los niveles de reserva del suelo, por lo que es factible integrarlo como complemento para un plan de suficiencia o mantenimiento de la fertilidad de los suelos. Sin embargo, cuando los niveles de disponibilidad del nutriente en el suelo son muy bajos, es fundamental aplicarlo.

Primer paso: calcular el rendimiento con 5 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 0.4 \text{ t ha}^{-1} = 0.14 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.14 \text{ t ha}^{-1} + 0.4 \text{ t ha}^{-1} = 0.54 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 5.18 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 5.18 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0.54 \text{ t ha}^{-1} = 2.8 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{2.8 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.2} = 14 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 6 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo

$$RC = IAR \times NCF \quad \dots(7)$$

$$RC = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima mediante la fórmula 8.

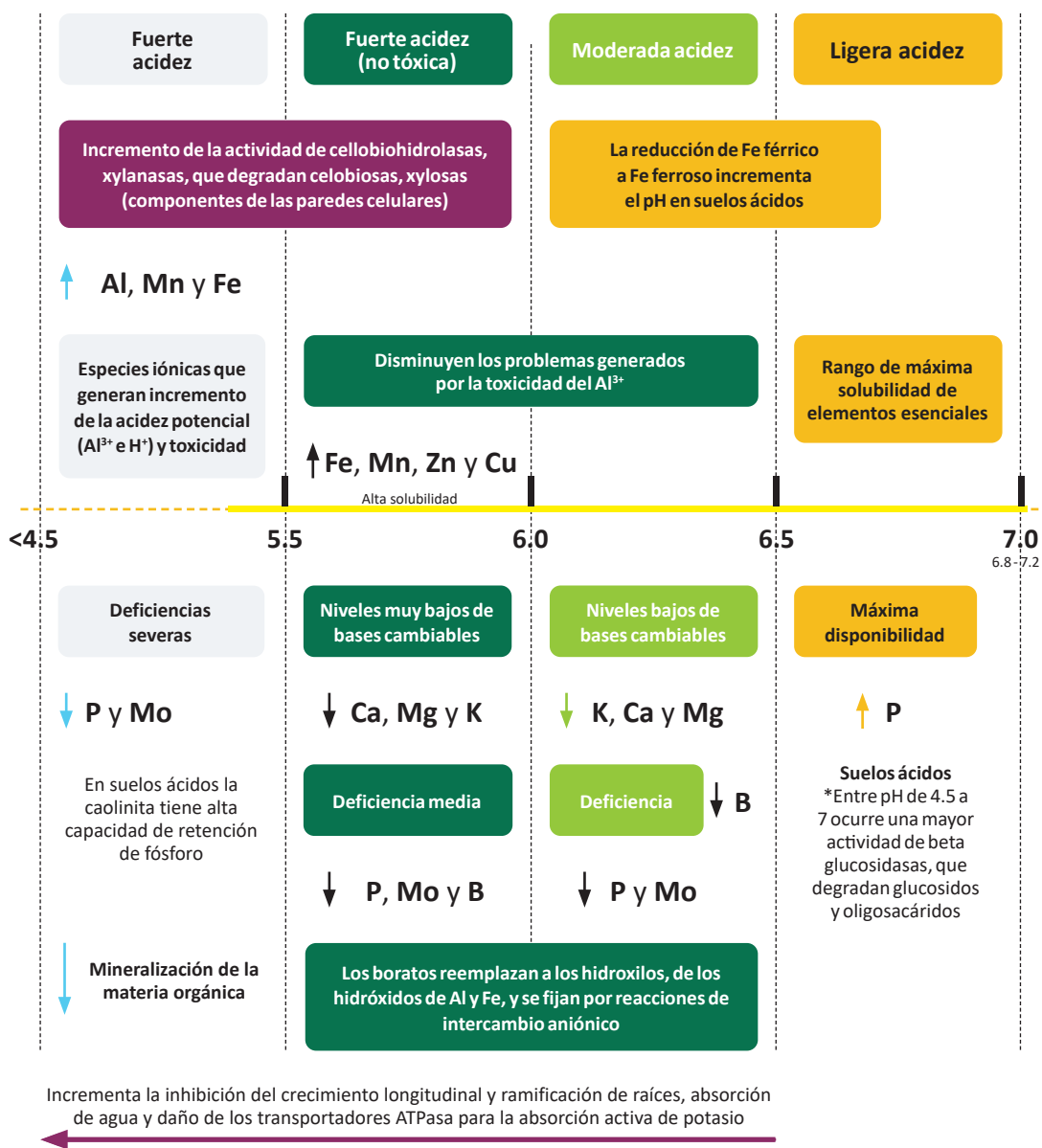
$$\text{Dosis de fertilización} = RM + RC \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización} = 14 \text{ kg ha}^{-1} + 9 \text{ kg ha}^{-1} = 23 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de café es 23 kg por hectárea.

2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes

La medición del pH en el suelo tiene su origen en la química ácido-base de Arrhenius y Bronsted-Lowry, y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa (Atkins et al., 2023). Sus aplicaciones en estudios de fertilidad inician en las primeras décadas del siglo XX, con estudios pioneros que demostraron la relación entre el pH del suelo y la solubilidad de los nutrientes esenciales (Pierre y Banwart, 1973). Actualmente, se considera que el pH del suelo controla las comunidades microbianas y la actividad enzimática de la solución suelo, además de modular los mecanismos de estabilización de carbono del suelo (Wang y Kuzyakov, 2024). Por estos motivos, es considerada una variable maestra dentro del análisis debido a que afecta una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se presentan un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos y básicos según Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



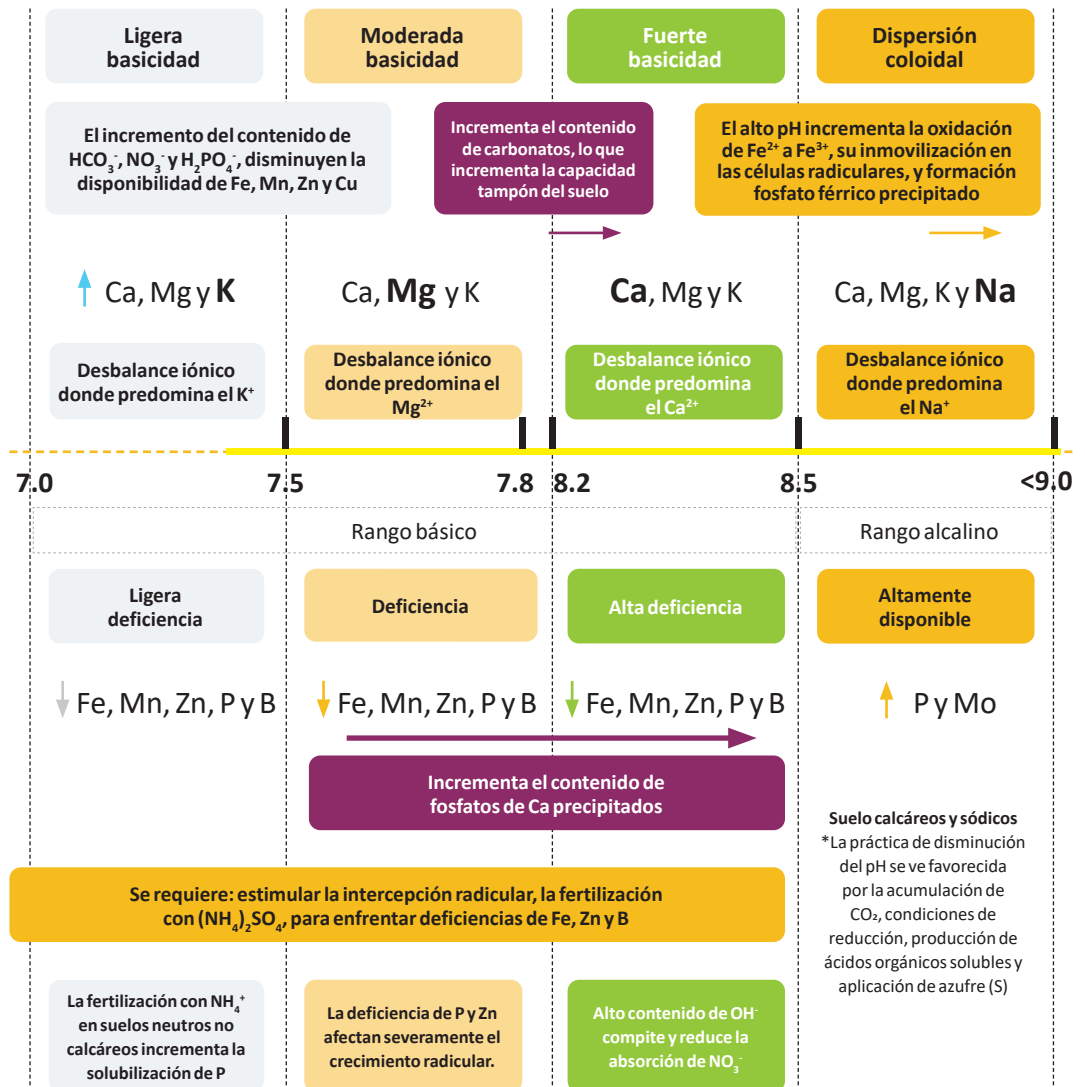


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 como una alternativa a la clasificación taxonómica de suelos (Garbanzo-León et al., 2017). El análisis geoestadístico de las propiedades del suelo es una herramienta útil para evaluar y predecir la variabilidad espacial de las propiedades como pH, textura, densidad aparente y nutrientes (Niebla-Torres et al., 2021). Mediante técnicas de interpolación como el método *kriging* con ajuste de modelos de semivariograma de tipo empíricos (lineal, esférico, circular y gaussiano), se pueden crear mapas que reflejan la distribución espacial de estas propiedades, lo que es crucial para la agricultura, el manejo sostenible del suelo y la aplicación de fertilizantes (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

La aplicación de modelos geoestadísticos, combinados con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite predecir las propiedades del suelo en áreas no muestreadas, lo que es especialmente útil en regiones con datos limitados (Moral-García, 2004). Además, la geoestadística ayuda a comprender las interrelaciones entre variables químicas y físicas del suelo, como la influencia del tamaño de partículas y la porosidad en la variabilidad espacial (Álvarez-Herrera et al., 2021). Esto contribuye significativamente a la optimización de prácticas agrícolas y al mantenimiento de la salud del suelo a largo plazo.



3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Pucallpa

3.1. Ubicación de la EEA Pucallpa

La EEA Pucallpa presenta suelos de tipo Gleysol Dístico y Cambisol Dístico, desarrollados a partir de materiales de naturaleza arcillosa y ácida (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Cuenta con ocho Centros Experimentales (CE) entre los que destacan el Alexander Von Humboldt y Campo Verde. Se encuentra en el distrito de Callería, provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali (Figura 5).

En la EEA se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región de Ucayali (Cruz-Luis et al., 2025).

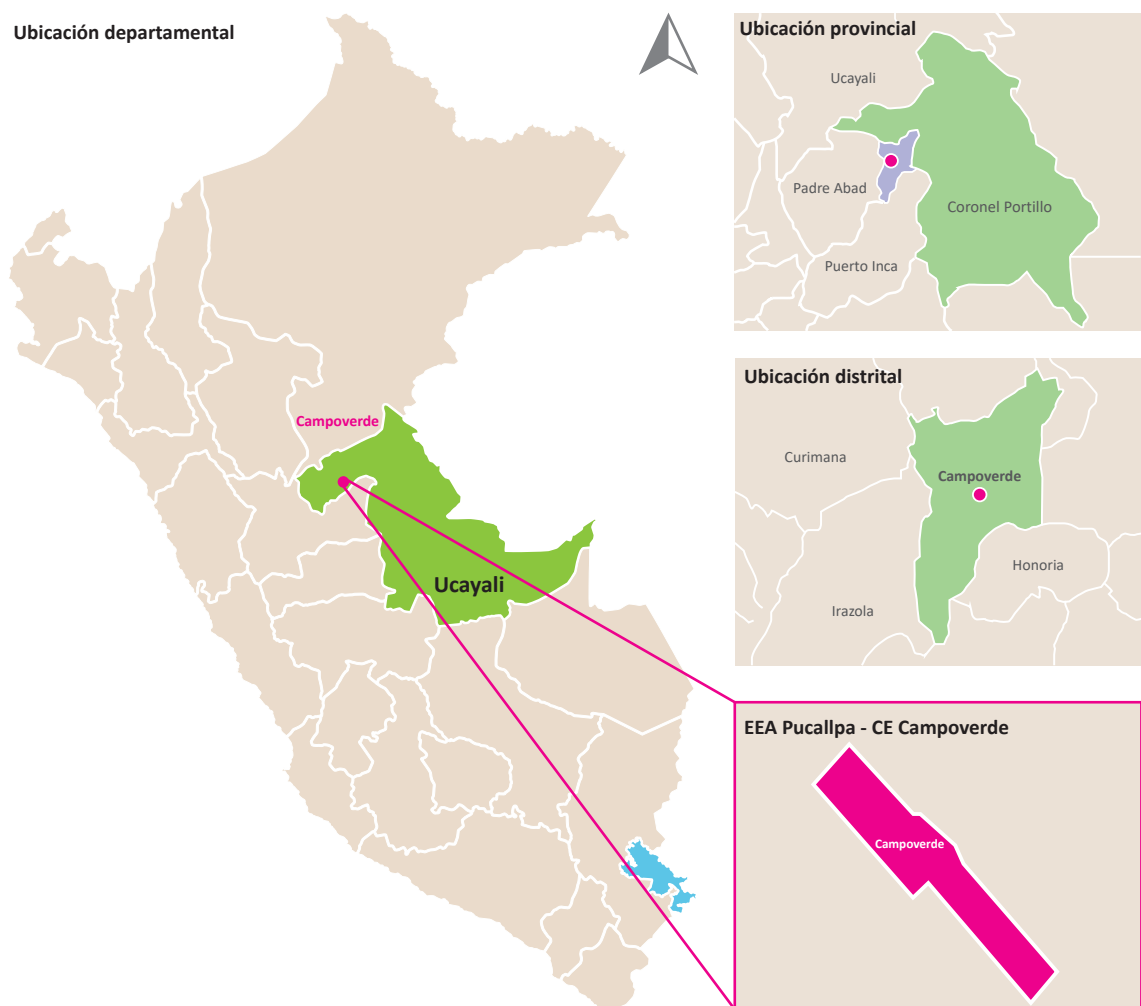


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Campo Verde de la EEA Pucallpa

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Pucallpa, se aplicó un diseño de muestreo estratificado basado en unidades de cobertura identificadas mediante análisis de imágenes satelitales. Este enfoque metodológico permite reducir la varianza intraestrato y optimizar la representatividad de las muestras en relación con la heterogeneidad espacial del área evaluada. La estratificación previa al muestreo garantiza una caracterización más precisa de las propiedades edáficas relevantes para el manejo del suelo, como parte de una estrategia integral de monitoreo de fertilidad. El proceso combinó técnicas de clasificación no supervisada y muestreo probabilístico espacial, utilizando herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se detallan los procedimientos aplicados para la determinación y colecta de los puntos de muestreo (Figura 6).

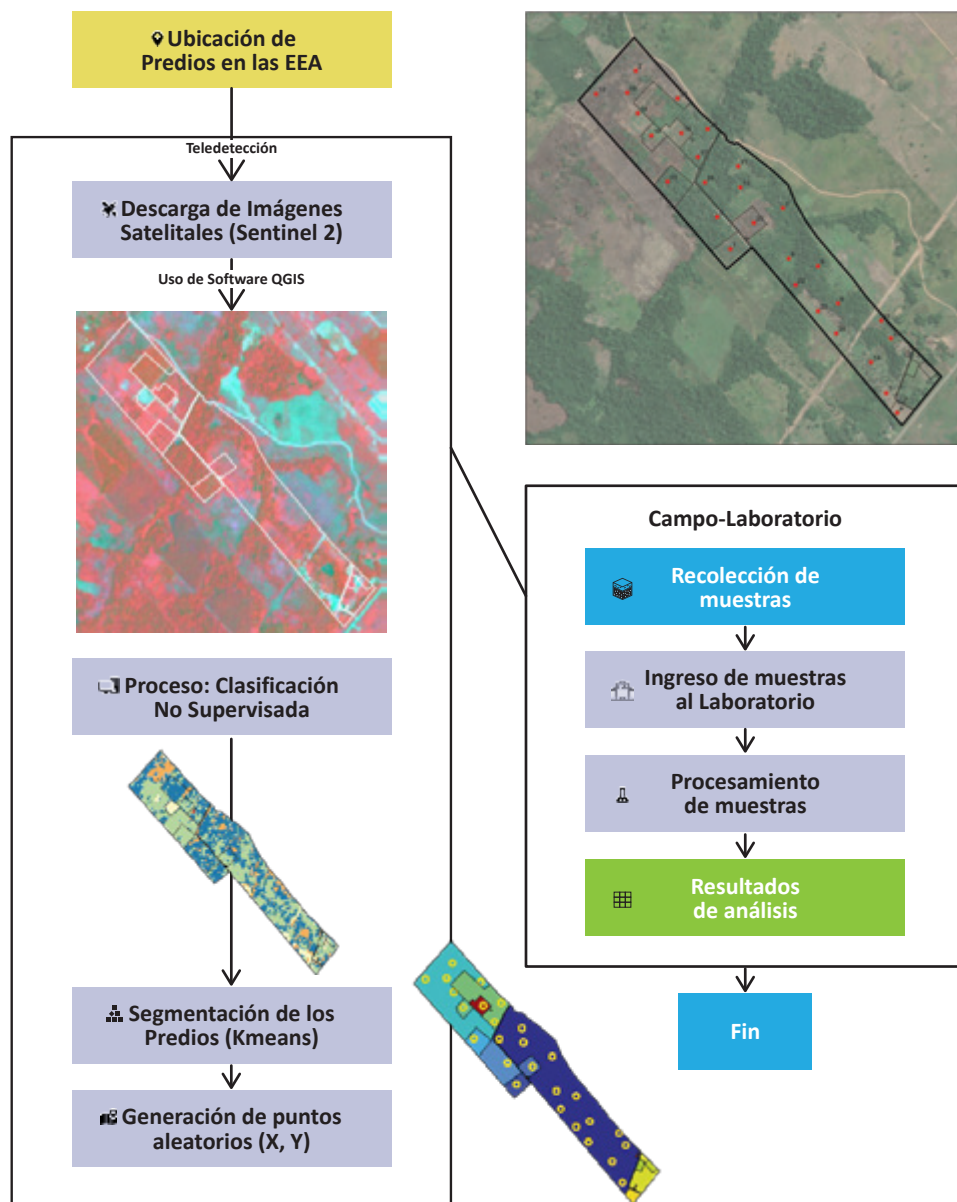


Figura 6. Flujo de trabajo seguido para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel 2, para identificar clases de cobertura utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, utilizamos el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado (Figura 7). Se identificaron 28 puntos de muestreo de suelos.



Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Pucallpa

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 28 puntos de muestreo. Los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes, y se encuentran ilustrados en la Figura 8.

- a. Retirar la hojarasca y vegetación de la superficie del suelo.
- b. Limpiar y desinfectar la superficie de la pala.
- c. Hacer un hoyo en forma de “V” de 30 cm de profundidad y área de 20 x 20 cm, aproximadamente.
- d. Tomar la muestra de la pared del hoyo. La “rebanada” debe tener de 2 a 3 cm de grosor y entre 20 a 40 cm de largo.
- e. Eliminar los residuos de los bordes de la pala para evitar contaminación.
- f. Depositar la muestra en un balde o contenedor.
- g. Desterronar la muestra y eliminar raíces, restos orgánicos u otros contaminantes.
- h. Tomar una porción aproximada de 1 kg en dos bolsas de plástico. Entre una y otra colocar la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelo. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis, preferentemente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA Pucallpa para su posterior procesamiento, por lo que se detallan los procedimientos analíticos realizados en este laboratorio. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C por 48 horas. Una vez realizada esta acción se realizaron los análisis, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros determinados en las muestras colectadas y su metodología de análisis

| Parámetro | Método de análisis | Referencia |
|-------------------------------------|---|--|
| Porcentaje de arena, limo y arcilla | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002) |
| pH (1:2.5) | Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) | Environmental Protection Agency (EPA, 2004) |
| Conductividad eléctrica (CE) (1:5) | ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo | International Organization of Standardization (ISO, 1994) |
| Carbonatos | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método del calcímetro | SEMARNAT (2002) |
| Materia orgánica (MO) | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black | SEMARNAT (2002) |
| N total | ISO 11261: Determinación de Nitrógeno Total por Kjeldahl Modificado | ISO (1995) |
| P disponible | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Bray y Kurtz | SEMARNAT (2002) |
| K disponible | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 | SEMARNAT (2002) |
| Bases intercambiables | Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio. | SEMARNAT (2002) |

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados de la Tabla 2 revelan que el suelo de la EEA Pucallpa se caracteriza, en promedio, por una textura franco-arenosa (51 % de arena, 28 % de arcilla) de variabilidad media ($CV \approx 23\%$), una fuerte acidez ($pH = 4.8 \pm 0.3$, $CV = 6\%$) y un bajo contenido de materia orgánica ($1.9\% \pm 0.4\%$). Estos rasgos son típicos de Ultisoles tropicales y explican la reducida capacidad de intercambio catiónico observada (4.1 cmol kg^{-1}). La saturación del complejo de cambio está dominada por aluminio ($PAI \approx 53\%$), mientras que el Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ muestran concentraciones bajas y heterogéneas, lo que sugiere un alto riesgo de desequilibrio nutricional. En conjunto, el diagnóstico preliminar apunta a suelos ácidos con fertilidad intrínseca limitada y escasa amortiguación química, situación que exige estrategias integradas de encalado, aplicación de materia orgánica y reposición de bases.

Por otro lado, varias variables presentan una dispersión excepcionalmente alta que amerita un análisis espacial detallado: la conductividad eléctrica ($CV > 100\%$) y el fósforo disponible ($CV > 140\%$) exhiben *hotspots* aislados con valores hasta seis veces superiores a la mediana, mientras que los cationes y la propia CIC duplican o triplican su variabilidad media. Esta heterogeneidad justifica el uso de geoestadística para mapear patrones locales y optimizar el muestreo. De este modo, se asegura una transición lógica entre la descripción de datos y los modelos espaciales, y se ofrece una base sólida para explicar las sinergias (o antagonismos) edáficos que condicionan la productividad en la región.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la EEA Pucallpa

| Variable | Unidad | Media | SD | Mediana | Mínimo | Máximo |
|-----------|-----------------------|-------|-------|---------|--------|--------|
| Arena | % | 50.81 | 11.94 | 52.95 | 15.77 | 67.77 |
| Limo | % | 21.48 | 7.35 | 19.37 | 13.58 | 43.73 |
| Arcilla | % | 27.71 | 6.16 | 28.50 | 18.58 | 42.50 |
| pH | und | 4.80 | 0.31 | 4.76 | 4.24 | 5.36 |
| CE | dS m^{-1} | 0.19 | 0.22 | 0.13 | 0.04 | 1.20 |
| MO | % | 1.85 | 0.36 | 1.82 | 0.94 | 2.42 |
| N total | % | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.05 | 0.12 |
| P-Bray | mg kg^{-1} | 5.34 | 7.66 | 2.35 | 0.89 | 28.92 |
| Ca^{2+} | cmol kg^{-1} | 1.24 | 0.79 | 1.10 | 0.17 | 3.46 |
| Mg^{2+} | cmol kg^{-1} | 0.33 | 0.25 | 0.24 | 0.02 | 1.08 |
| K^+ | cmol kg^{-1} | 0.17 | 0.07 | 0.16 | 0.06 | 0.35 |
| CIC | cmol kg^{-1} | 4.05 | 1.51 | 4.10 | 1.43 | 7.31 |
| PAI | % | 52.85 | 26.17 | 6.80 | 93.02 | 58.32 |
| PCI | % | 33.78 | 21.12 | 28.67 | 2.33 | 78.46 |
| PMI | % | 8.62 | 5.80 | 0.84 | 21.96 | 7.68 |
| PPI | % | 4.75 | 2.86 | 1.72 | 16.15 | 4.31 |

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PAI: porcentaje de aluminio intercambiable, P-Bray: fósforo obtenido a partir del método de Bray y Kurtz, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, MO: materia orgánica del suelo.

Es importante señalar que los suelos de esta EEA (Tabla 2) presentan, en su mayoría, un pH fuertemente ácido (4.80 ± 0.31), con deficiencias severas y alta variabilidad de fósforo (5.34 ± 7.66 mg kg⁻¹). Asimismo, presentan altos porcentajes de aluminio intercambiable (PAI), de 52.85 ± 26.17 %, superiores al umbral de la mayoría de los cultivos (25 %). También, los porcentajes de calcio intercambiable (PCI) y los porcentajes de magnesio intercambiable (PMI) se encuentran desbalanceados con valores muy bajos.

3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo

Este protocolo está diseñado para ser aplicado en el análisis espacial de cualquier propiedad del suelo (materia orgánica, pH, textura, etc.), siempre que se cuente con datos georreferenciados confiables. Una muestra confiable se caracteriza por: tener precisión geográfica, ser representativa del área de estudio, presentar calidad en las mediciones y la minimización de errores.

Requisitos previos para el mapeo:

- a. **Computador:** QGIS instalado (versión recomendada: 3.28 o superior).
- b. **Complemento:** *Smart-Map* instalado y configurado.
- c. **Base de datos:** *Shapefile* de puntos de muestras del suelo con información georreferenciada y valores de la variable a analizar.
- d. **Unidades y proyección:** las capas de entrada (puntos georreferenciados y contorno del área de estudio) deben estar en el sistema métrico *Universal Transversal Mercator* (UTM), cuyas unidades son los metros.

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, *Shapefile*, u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (e. g. porcentaje de materia orgánica). Verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de datos:** se debe realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Así, se calcularon medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y se evaluó la dispersión con la desviación estándar. Además, se usaron diagramas de caja para detectar patrones y detectar posibles valores atípicos.
- c. **Carga en QGIS:** importar los datos georreferenciados como una capa vectorial en QGIS y confirmar que la proyección de la capa sea coherente con la zona de estudio.

3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran

Procedimiento:

- a. Abrir el complemento **Smart-Map**.
- b. Cargar la capa vectorial de los puntos georreferenciados.
- c. Seleccionar la variable a analizar.
- d. Delimitar los puntos de muestreo con el contorno del área de estudio.
- e. Definir el tamaño de celda del ráster de salida (por ejemplo, 5 m x 5 m, dependiendo de la resolución deseada).
- f. Generar el índice de Moran (fórmula 9) y el p-valor.

$$I = \sum_n^1 ij \dots(9)$$

Donde:

$I > 0$: existe autocorrelación espacial positiva (valores similares tienden a estar juntos).

$I < 0$: existe autocorrelación espacial negativa (valores diferentes tienden a estar juntos).

$I = 0$: ausencia de autocorrelación (se da una distribución aleatoria).

Si el p-valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que hay evidencia de un patrón espacial significativo. Si el p-valor es mayor a 0.05, no se puede rechazar la H_0 , lo que sugiere que los datos no tienen autocorrelación espacial significativa.

Según el cálculo de estas medidas estadísticas, se procederá o no al cálculo del variograma experimental, ajuste de un modelo a dicho variograma, la interpolación *kriging* y su validación cruzada.

3.7. Interpolación *kriging* y validación cruzada con indicadores geoestadísticos

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- Ajustar los parámetros del modelo:
 - Sill** (Umbral): varianza de las diferencias máximas entre los puntos.
 - Range** (Alcance): distancia a partir de la cual no hay autocorrelación significativa.
 - Nugget** (Pepita): variabilidad no explicada (ruido o error de medición).
- Calcular la proporción *Still-Nugget* (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

- Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- Seleccionar la variable y el modelo ajustado.
- Seleccionar el método de interpolación: *kriging ordinario*.
- Generar el mapa rasterizado.
- Exportar el mapa en formato **Geo TIFF** para su almacenamiento y análisis posterior.

3.7.3. Validación cruzada

Para realizar una validación cruzada de los resultados, se deberá hacer lo siguiente: En **Smart-Map**, activar la opción de validación cruzada o “cross validation”. El complemento evalúa el error mediante:

- Error cuadrático medio (RMSE)**: Mide la precisión del modelo, donde un valor alto puede significar que el modelo no representa adecuadamente la variabilidad espacial o que los datos contienen errores o son insuficientes (fórmula 10).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_1(x_i) - z_2(x_i)]^2} \quad \dots(10)$$

Donde:

n: el número de muestras.

$Z_1(X_i)$: valores predichos en el sitio i.

$Z_2(X_i)$: valores observados en el sitio i.

b. Coeficiente de determinación (R^2): Mide qué tan bien las predicciones del modelo explican la variabilidad de los datos (fórmula 11). Si el R^2 es igual a 1, las predicciones son perfectas y el modelo explica toda la variabilidad de los datos; si el $R^2 > 0.7$, el modelo tiene una buena capacidad predictiva (esto es relativo según el campo de aplicación); si el $R^2 < 0.5$, el modelo tiene una baja capacidad predictiva (no explica bien la variabilidad espacial); finalmente, un $R^2 = 0$ significa que el modelo no se ajusta en absoluto a los datos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z_1(x_i) - Z_2(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z_1(x_i) - Z_1]^2} \quad \dots(11)$$

Donde:

n: el número de muestras.

$Z_1(X_i)$: valores predichos en el sitio i.

$Z_2(X_i)$: valores observados en el sitio i.

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la tabla 3. Las propiedades del suelo con mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos son el Al^{3+} (RMSE = 0.68 y $R^2 = 0.81$), la CIC (RMSE = 0.55 y $R^2 = 0.78$), la materia orgánica (RMSE = 0.47 y $R^2 = 0.49$) y el nitrógeno (RMSE = 0.04 y $R^2 = 0.49$). Lo cual indica un alto grado de predictibilidad espacial de esas propiedades del suelo y que la interpretación derivada a partir de esas características puede replicarse en zonas no muestreadas.

Tabla 3. Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo de la EEA Pucallpa

| Variable | Modelo | Nugget (C_0) | Sill (C_0+C) | Range (m) | Cross-validation | |
|---------------|--------------------|------------------|------------------|-----------|------------------|-------|
| | | | | | RMSE | R^2 |
| Arena | <i>Exponential</i> | 0.21 | 0.74 | 991.71 | 0.70 | 0.16 |
| Limo | <i>Exponential</i> | 0.08 | 0.91 | 991.71 | 1.01 | 0.07 |
| Arcilla | <i>Gaussian</i> | 0.29 | 1.29 | 991.71 | 0.69 | 0.46 |
| pH | <i>Gaussian</i> | 0.02 | 0.06 | 991.71 | 0.18 | 0.30 |
| Ce | <i>Exponential</i> | 0.03 | 0.03 | 991.71 | 0.55 | 0.47 |
| MO | <i>Exponential</i> | 0.03 | 0.05 | 991.71 | 0.47 | 0.49 |
| N | <i>Exponential</i> | 0.00 | 0.00 | 991.71 | 0.04 | 0.49 |
| P disp | <i>Spherical</i> | 0.01 | 0.97 | 991.71 | 0.94 | 0.34 |
| K disp | <i>Exponential</i> | 0.00 | 0.00 | 991.71 | 0.07 | 0.09 |
| Ca^{2+} | <i>Spherical</i> | 0.02 | 0.16 | 991.71 | 0.40 | 0.20 |
| Mg^{2+} | <i>Exponential</i> | 0.00 | 0.03 | 991.71 | 0.20 | 0.09 |
| Al^{3+} | <i>Spherical</i> | 0.15 | 2.98 | 991.71 | 0.68 | 0.81 |
| CIC | <i>Spherical</i> | 0.45 | 3.10 | 991.71 | 0.55 | 0.78 |
| Bases totales | <i>Linear</i> | 0.94 | 0.82 | 991.71 | 0.17 | 0.12 |
| Sat. Al | <i>Spherical</i> | 0.23 | 1.58 | 991.71 | 1.23 | 0.49 |

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, N: nitrógeno total, P disp: fósforo disponible, K disp: potasio disponible, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Sat. Al: saturación de aluminio.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figuras 9-17). Estos mapas muestran la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la EEA Pucallpa. Asimismo, entre las propiedades del suelo evaluadas, las características relacionadas con la acidez del suelo como el Al^{3+} intercambiable, la CIC, variables relacionadas con la mineralización microbiana de la materia orgánica, y el almacenamiento de nitrógeno del suelo, alcanzaron un mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos, siendo estos los de mayor predictibilidad espacial en un rango de 991.71 m, respectivamente.

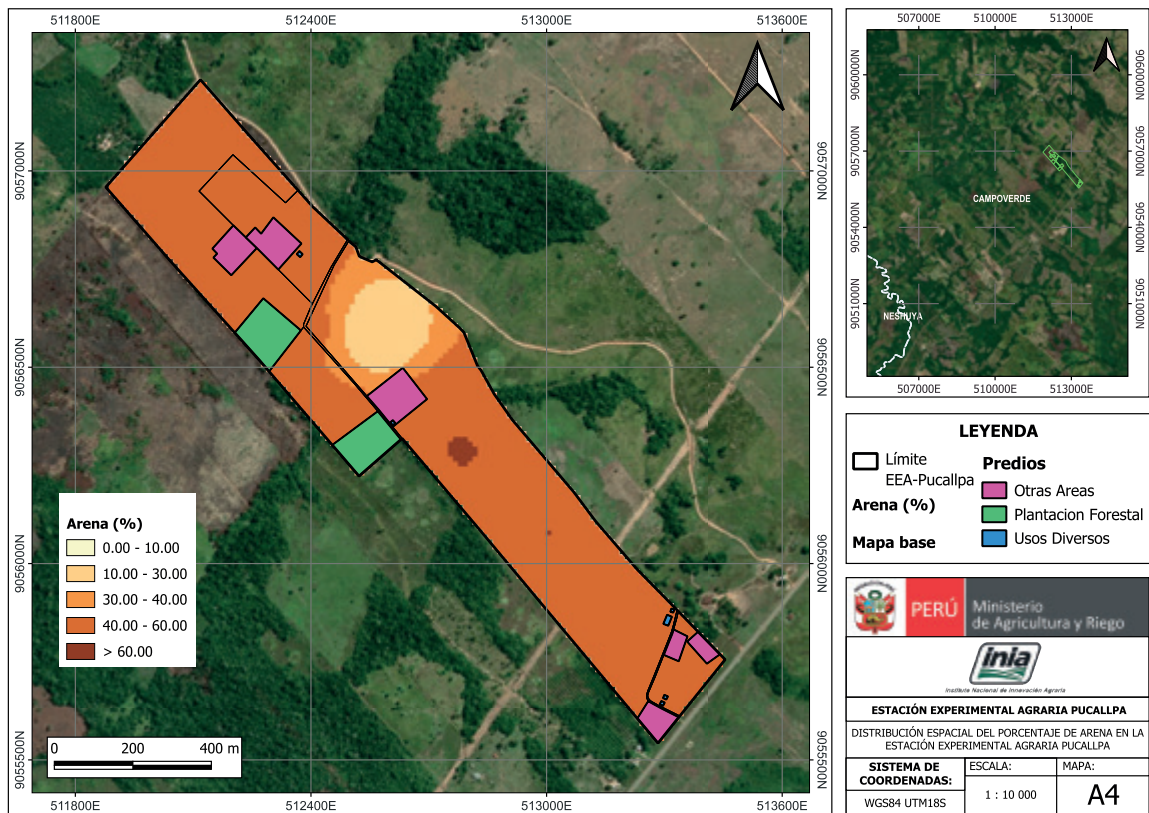


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

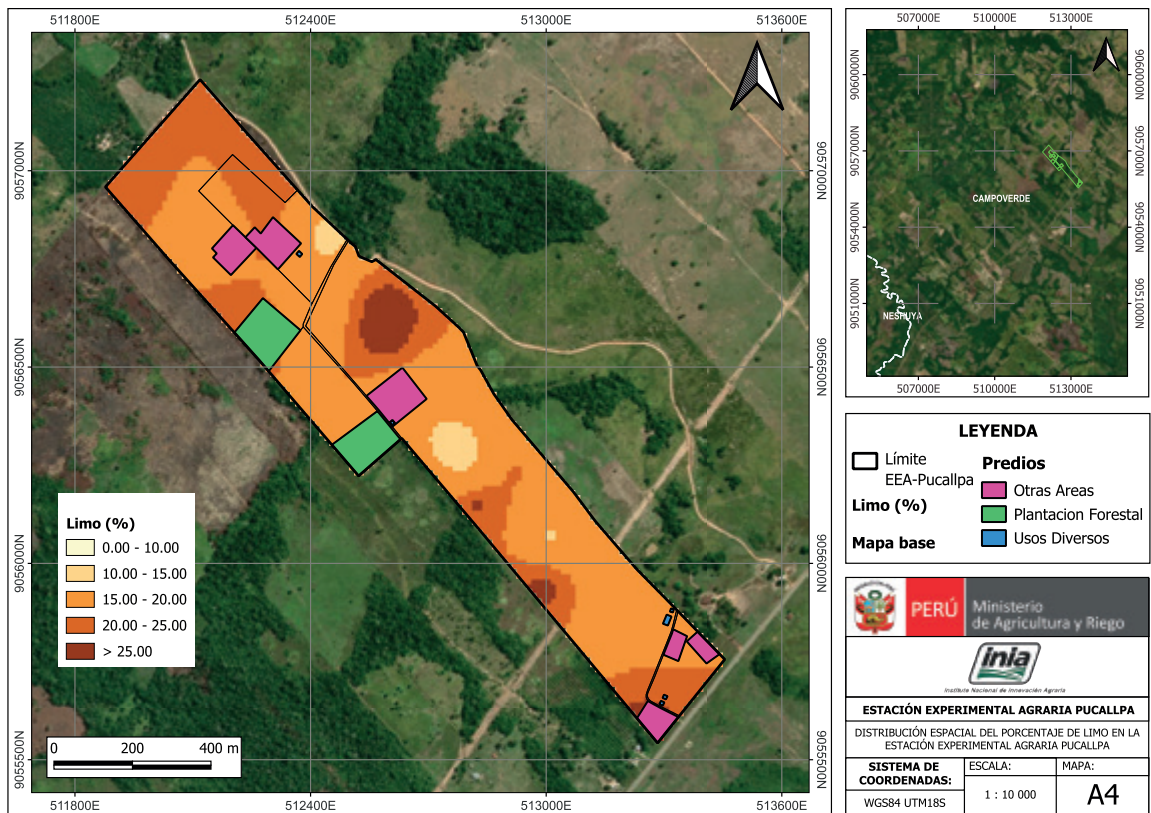


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

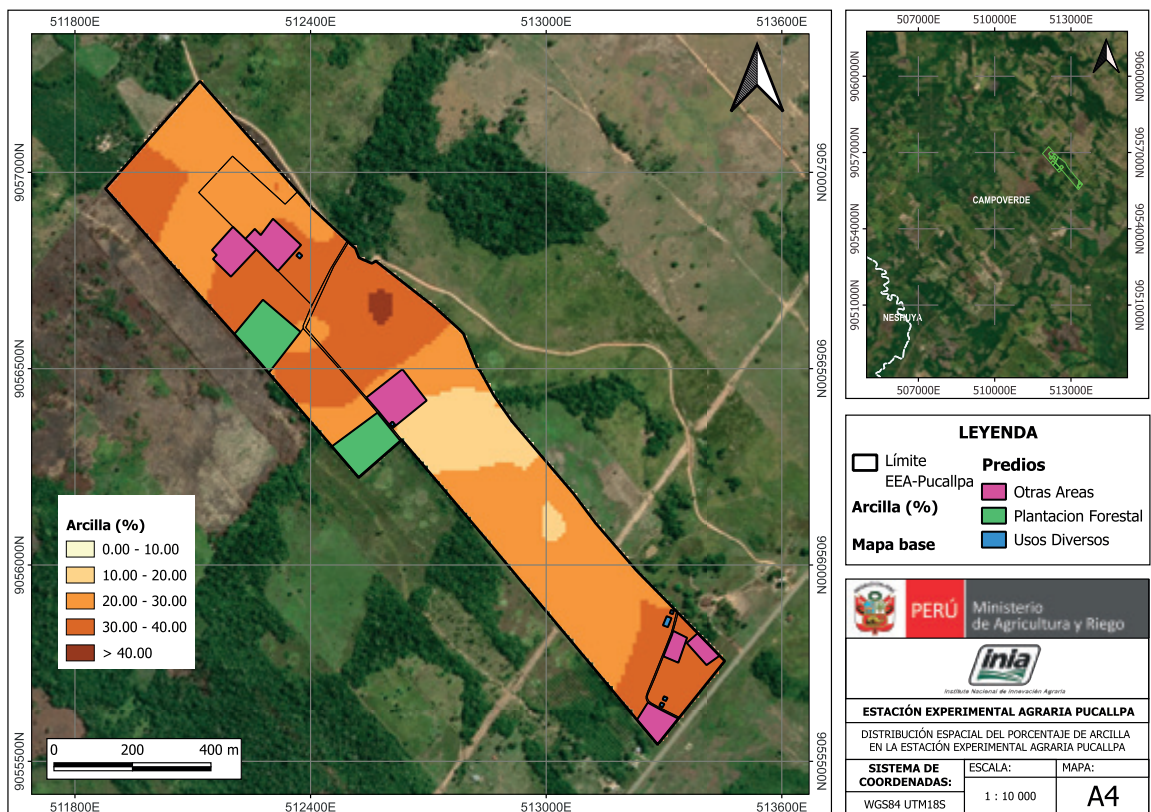


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

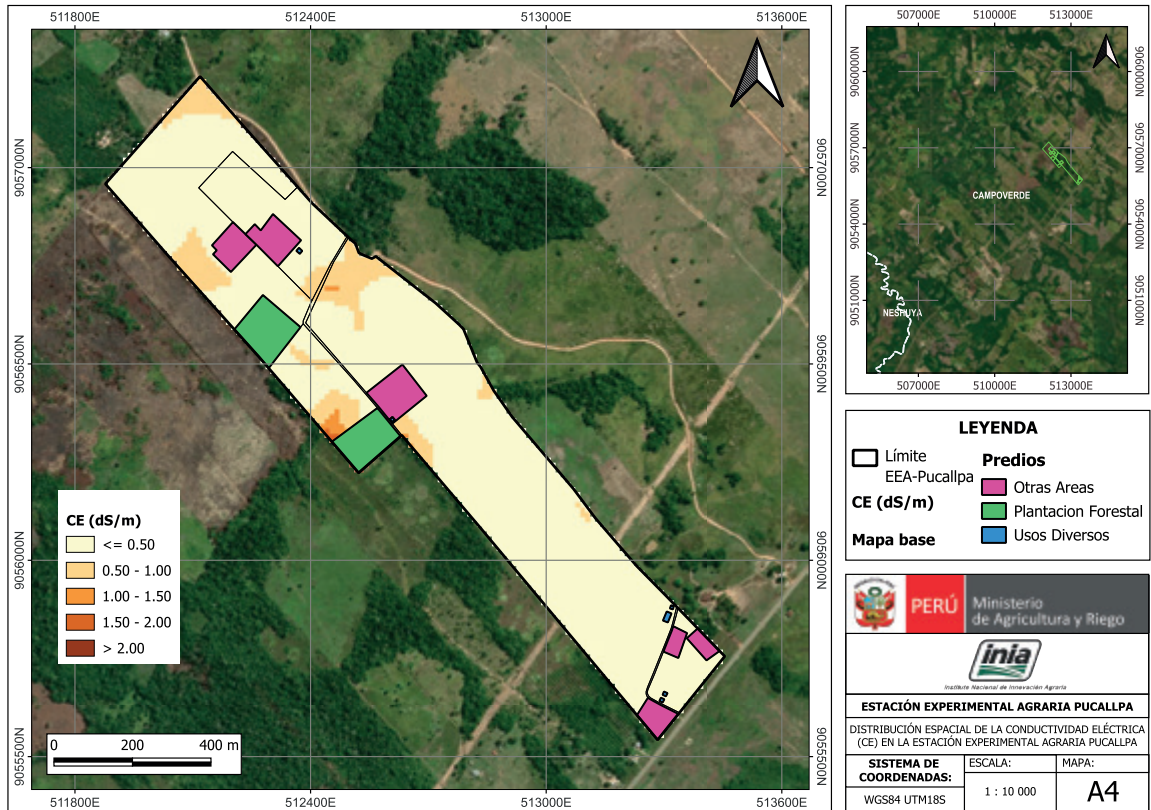


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica (CE)

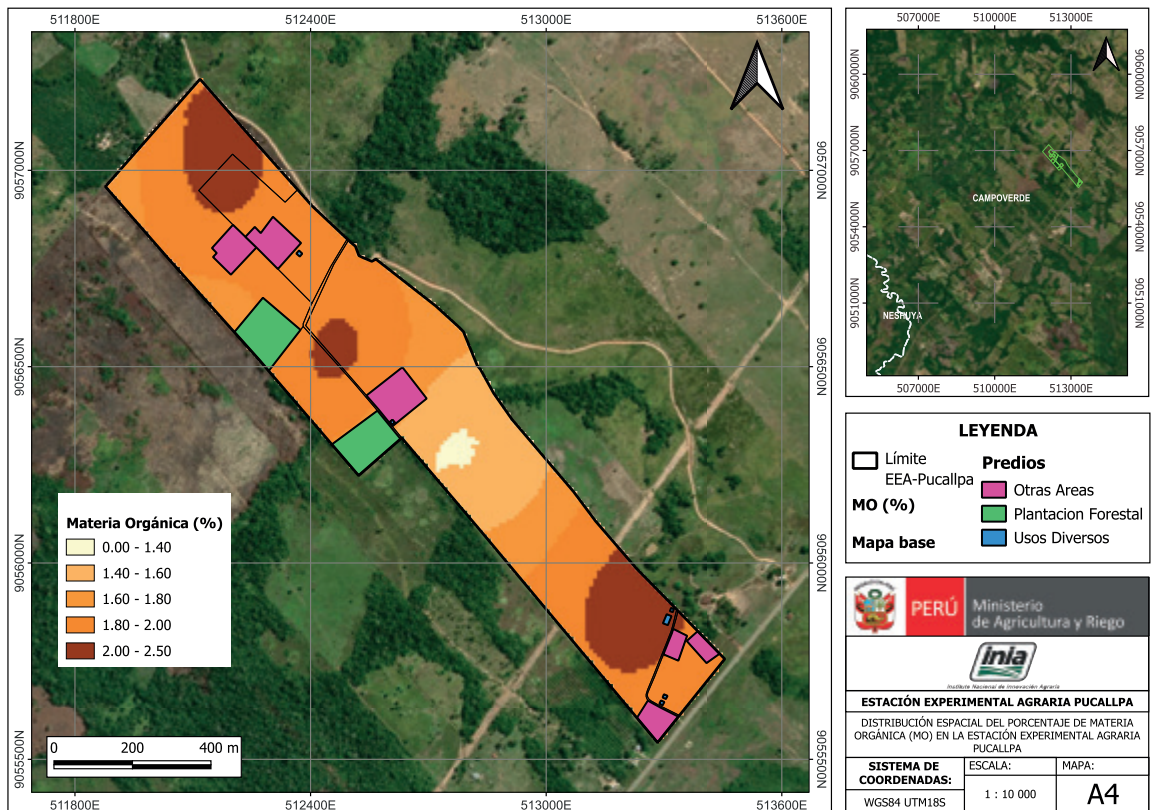


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica (MO)

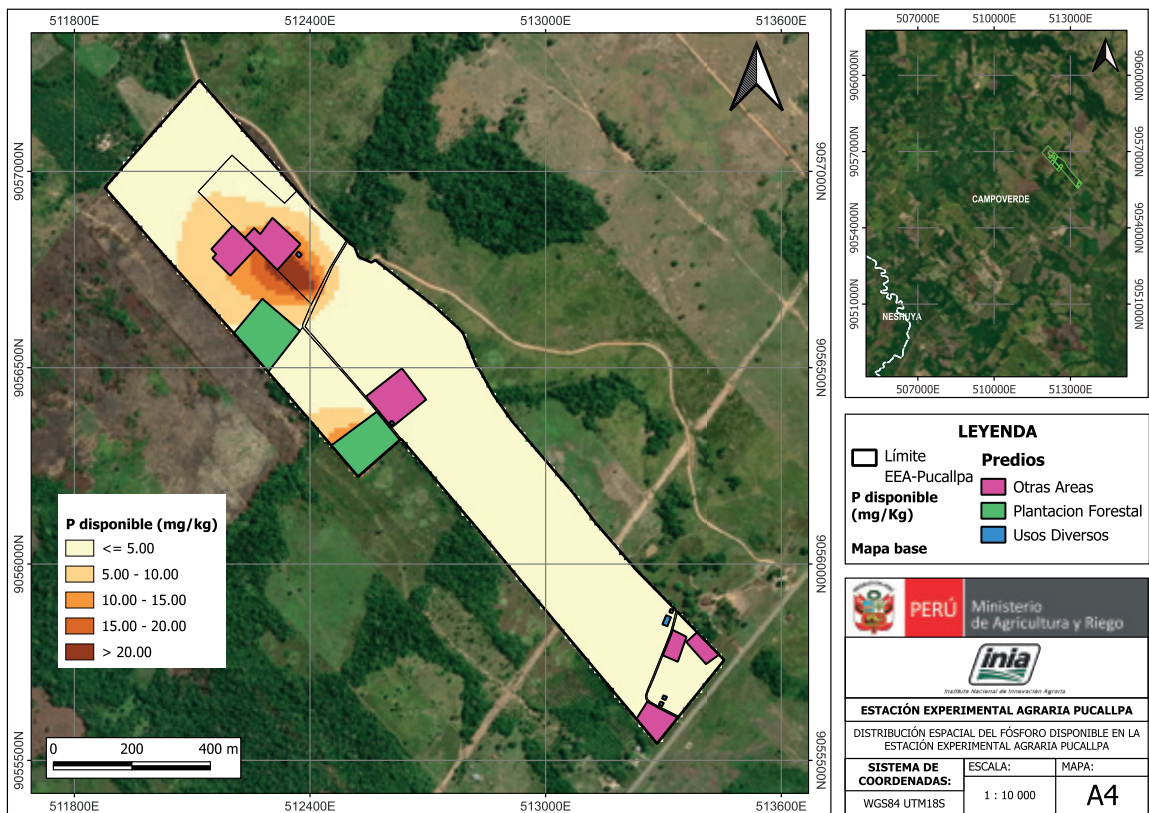


Figura 14. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

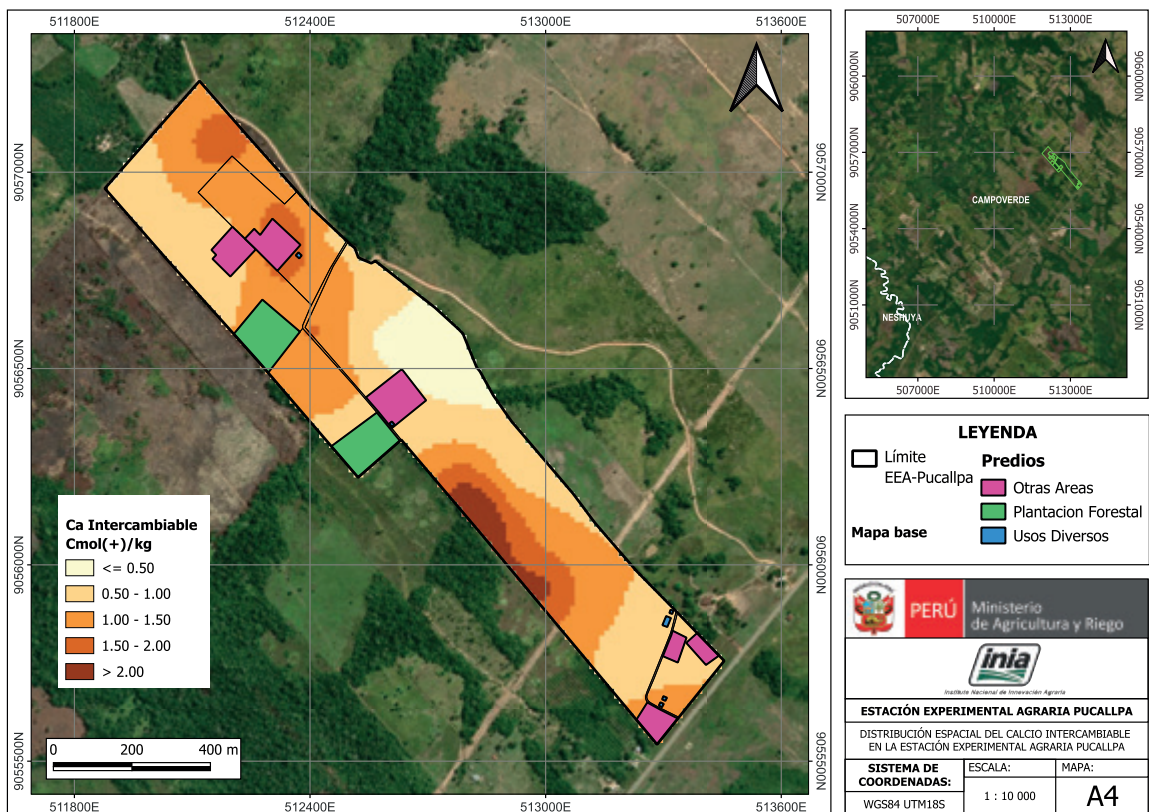


Figura 15. Mapa de variación espacial del calcio (Ca²⁺) intercambiable

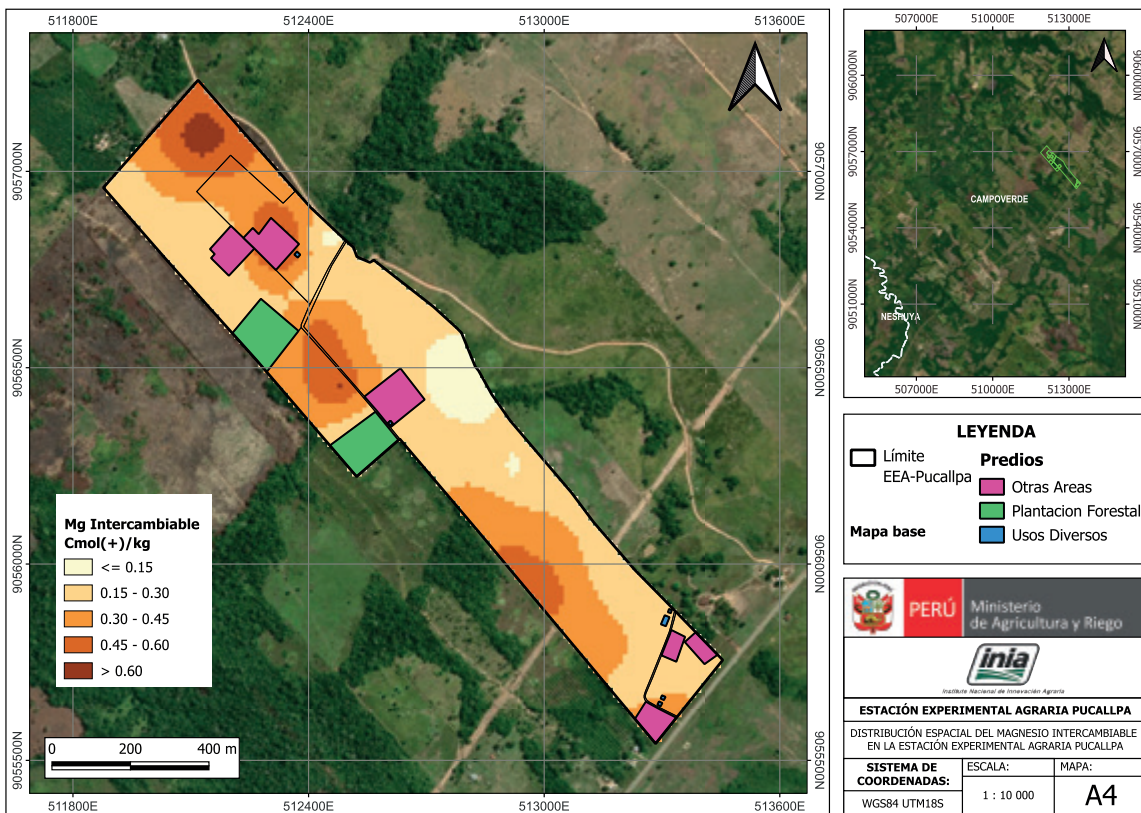


Figura 16. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

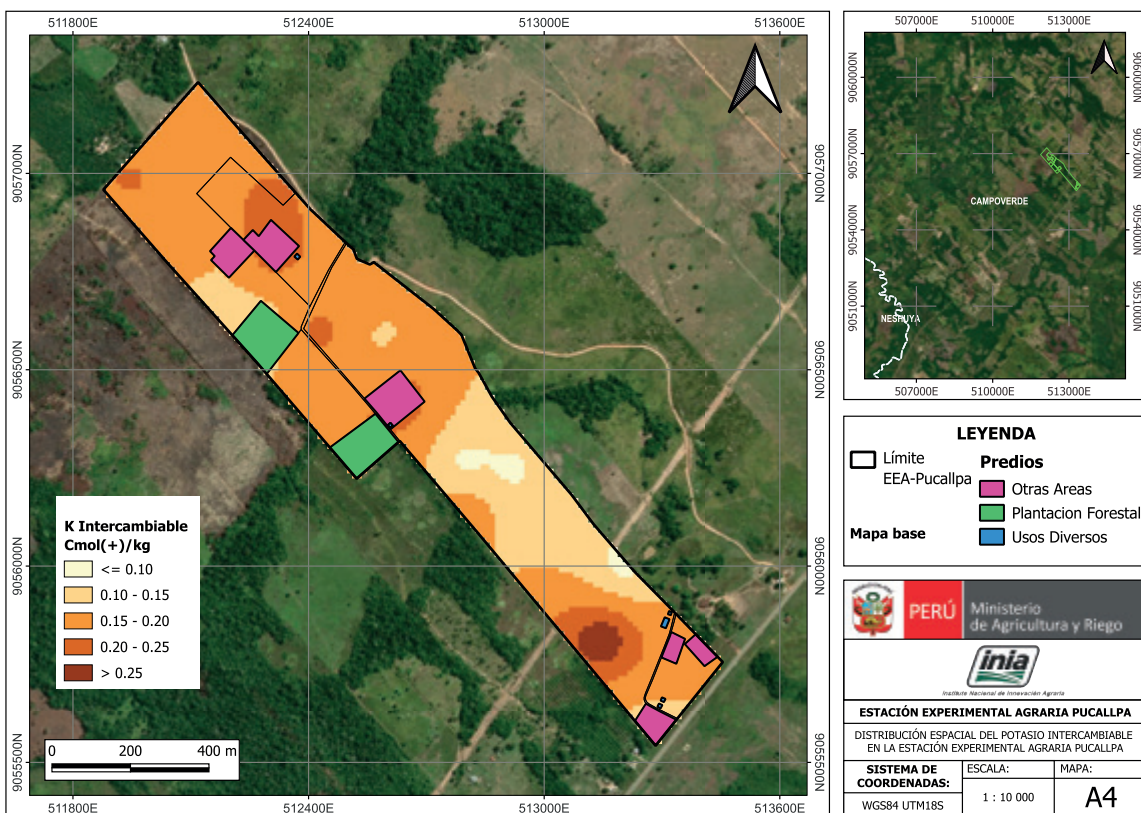


Figura 17. Mapa de variación espacial del potasio (K^+) intercambiable



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Pucallpa

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

El principal problema del suelo en el área estudiada es la acidez. Estos presentan un promedio de 4.80 ± 0.31 , que se ubica dentro del rango de acidez fuerte. El análisis geoestadístico identificó al Al^{3+} (Figura 18) como una de las variables de mayor predictibilidad espacial ($R^2 = 0.88$). Estos resultados nos indican que la hidrólisis del Al^{3+} intercambiable explica la acidez de los suelos de la EEA Pucallpa. Además, los suelos presentan muy bajos valores de PCI y PMI (Figuras 19 y 20), con promedios entre $33.78 \pm 21.12 \%$ y $8.62 \pm 5.80 \%$, respectivamente. Sumado a esto, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) efectiva del suelo (Figura 21) presentó una alta predictibilidad espacial ($R^2 = 0.88$). Esta condición sugiere que la acidez del suelo está directamente asociada por un bajo contenido de Ca^{2+} y la CIC. La presencia de estos cationes en el suelo no afecta directamente la actividad del H^+ en la solución suelo, pero si neutraliza la acidez potencial provocada por la reacción de hidrólisis del Al^{3+} . Por ello, cuando dichos cationes se encuentran en concentraciones bajas, la acidez del suelo aumenta.

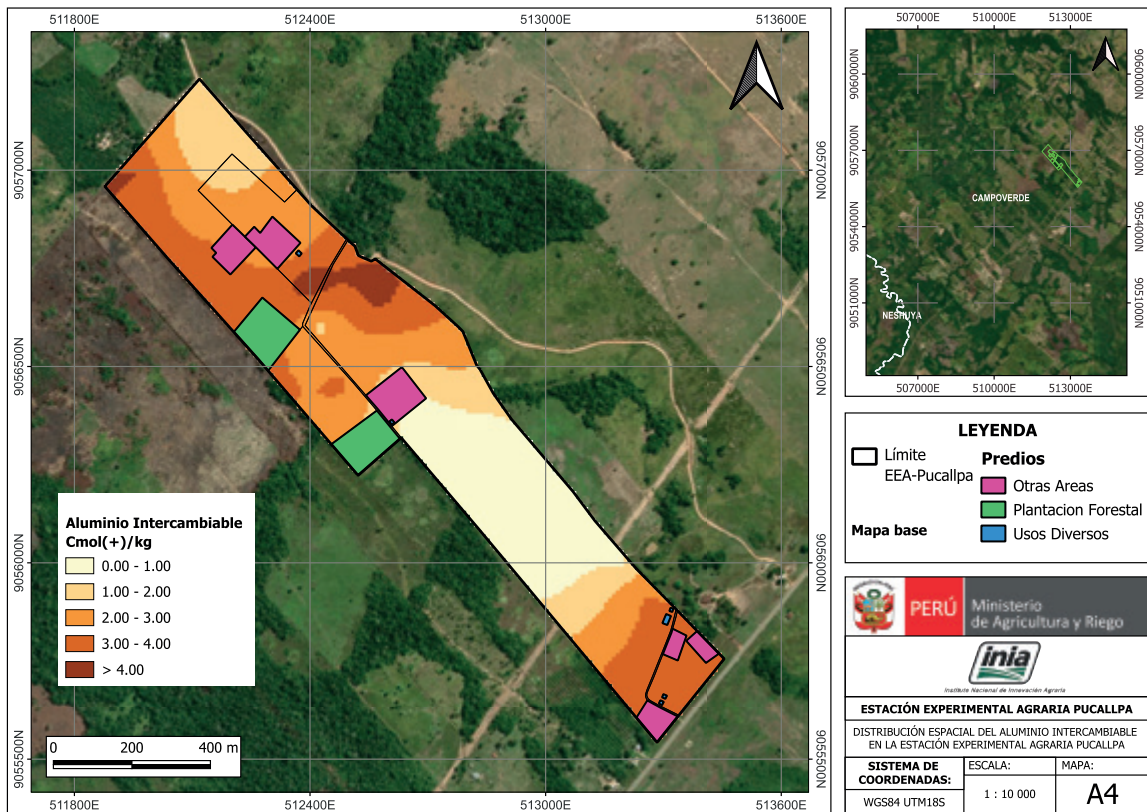


Figura 18. Mapa de variación espacial del aluminio (Al^{3+}) intercambiable

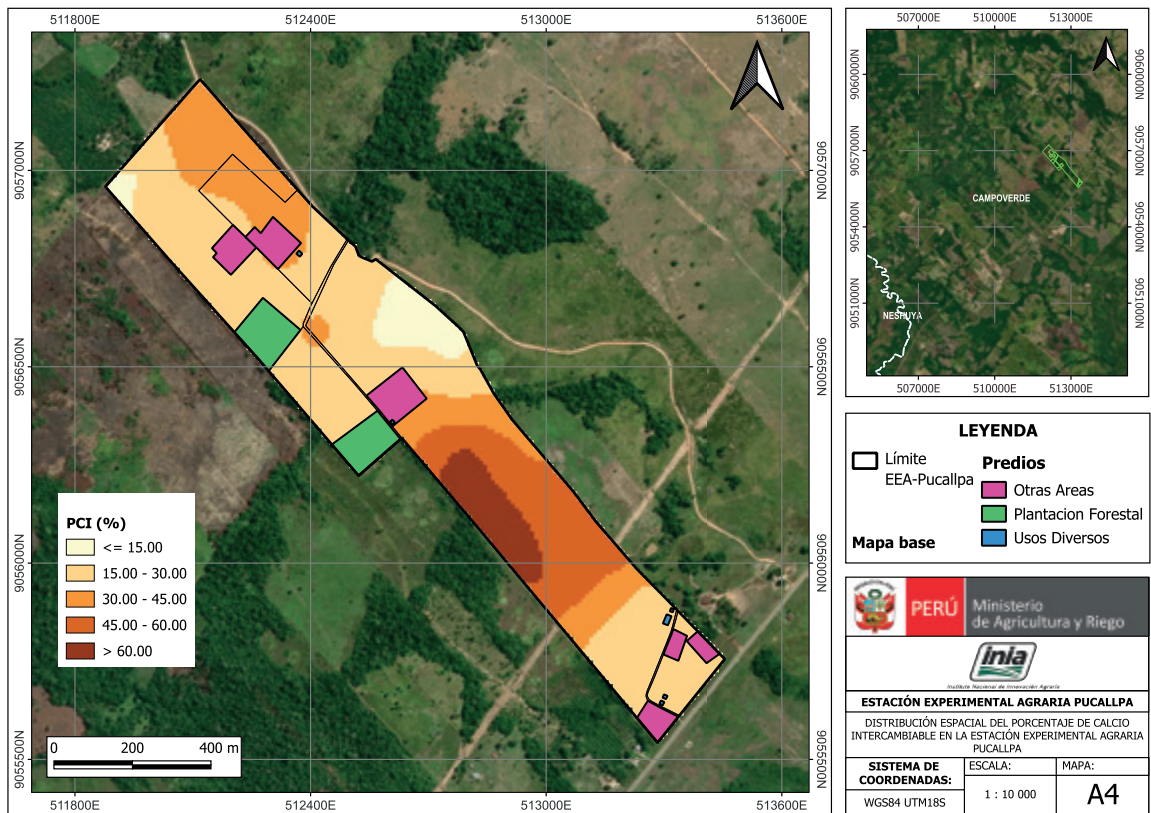


Figura 19. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio (Ca^{2+}) intercambiable (PCI)

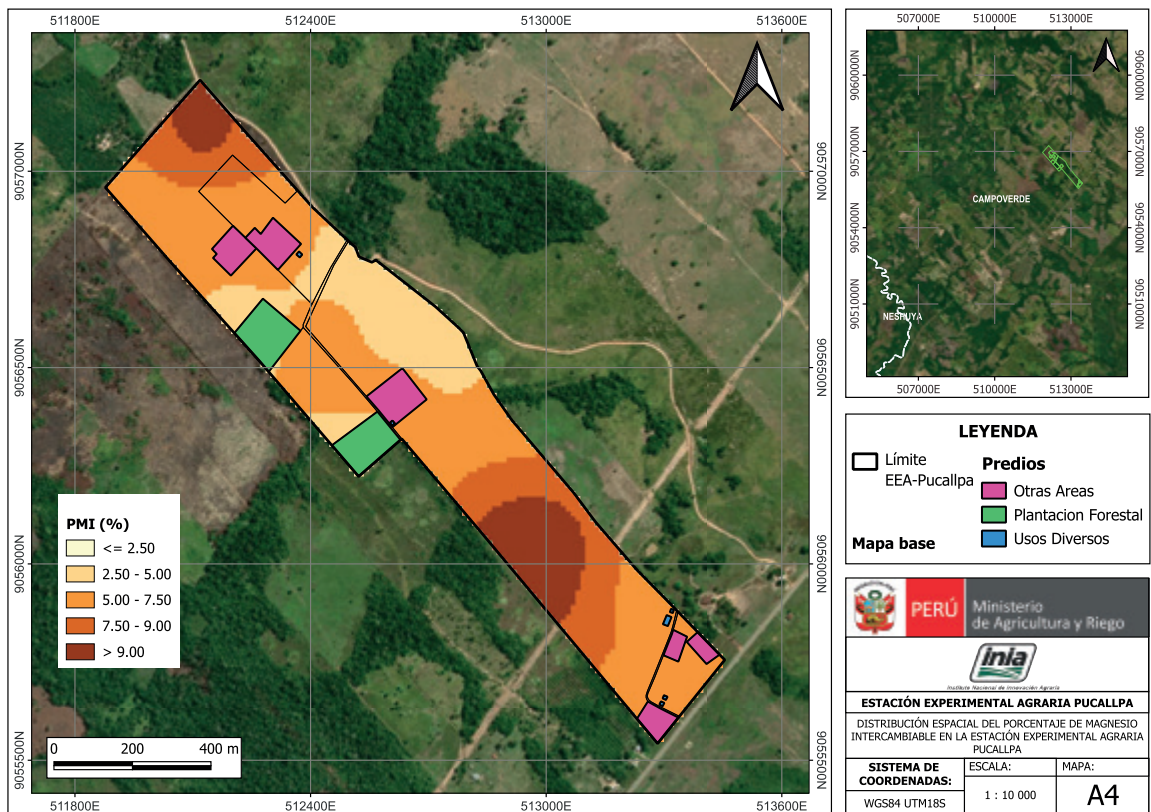


Figura 20. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio (Mg^{2+}) intercambiable (PMI)

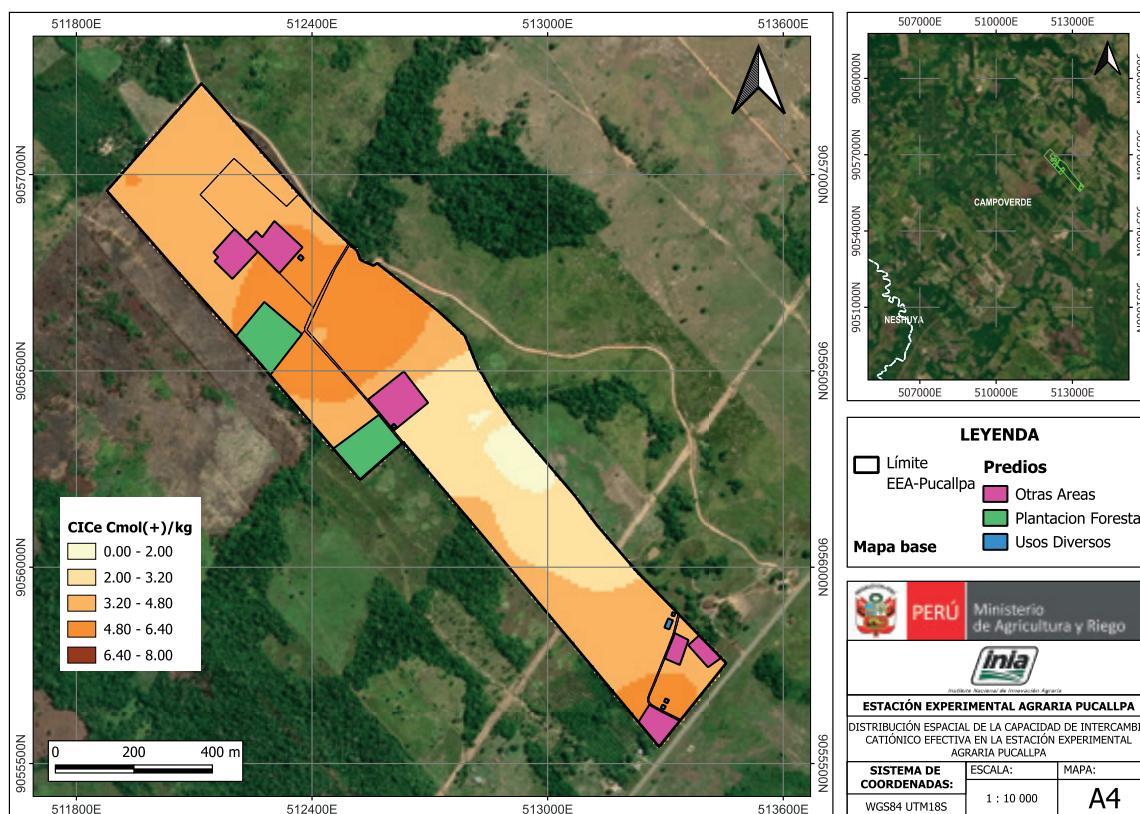


Figura 21. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) efectiva

La interpolación *kriging ordinario* permitió identificar cinco zonas con diferente nivel de concentración de Al^{3+} . La primera es la más degradada, con valores superiores a 4 cmol kg^{-1} y CIC efectiva entre 4.8 a 6.4 cmol kg^{-1} . A través de un análisis de componentes principales (INIA, resultados no publicados), se identificó que las variables con mayor contribución a la varianza explicada fueron el PCI, Al^{3+} , PAI, CIC, Mg^{2+} y la arcilla. Lo que nos brinda información suficiente para determinar que el requerimiento de encalado del suelo puede estimarse por el método de Minas Gerais 5A (Teixeira et al., 2020). Este método considera la capacidad buffer del suelo en función al porcentaje de arcilla y el requerimiento de encalado en función a un nivel mínimo de acidez intercambiable tolerable y un nivel mínimo de requerimiento de Ca^{2+} y Mg^{2+} , según la fórmulas 12, 13 y 14.

Además, la capacidad buffer (B) del suelo se estima utilizando el porcentaje de arcilla (arcilla %) y la fórmula 12:

$$B = 0.0302 + 0.06235 \times (\text{arcilla } \%) - 0.000257 \times (\text{arcilla } \%)^2 \quad \dots(12)$$

Considerando esta información, cuando el porcentaje de acidez tolerable (PAT) es mayor a 25 % y el $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ es mayor a 3.5 cmol kg^{-1} , aplica la fórmula 13:

$$RC = B [0.25 \times CICe] \quad \dots(13)$$

Y cuando, el PAT es mayor a 25 % y el $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ es menor a 3.5 cmol kg^{-1} , se aplica la fórmula 14:

$$\text{RC} = \text{B}[0.25 \times \text{CICe}] + [3.5 - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})] \dots(14)$$

Donde:

RC: requerimiento de cal en t ha^{-1}

B: capacidad buffer del suelo

PAT: porcentaje de acidez intercambiable tolerable

CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva

Mediante este procedimiento se ha estimado que el requerimiento de encalado para las zonas más degradadas es entre 4.50 a 8.72 t ha^{-1} de cal agrícola (Figura 22). De esta manera, la aplicación de cal agrícola permitirá incrementar el pH del suelo, la fertilidad potencial en función a un aumento de las cargas variables del suelo y los contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Además, permitirá superar la reactividad de los precipitados de fosfatos de Fe y Al, y los efectos tóxicos del aluminio e hidrógeno en el crecimiento radicular y la absorción de potasio. Asimismo, se evita un sobre encalado en zonas donde se requieren menores dosis, para evitar la adsorción y reducción de disponibilidad de boro. De forma complementaria, se ha demostrado que el uso de enmiendas orgánicas como el biochar son excelentes agentes encalantes, se recomienda complementar la dosis anual de cal mezclado con 2 t ha^{-1} de biochar de residuos municipales (Condori-Ataupillco et al., 2025).

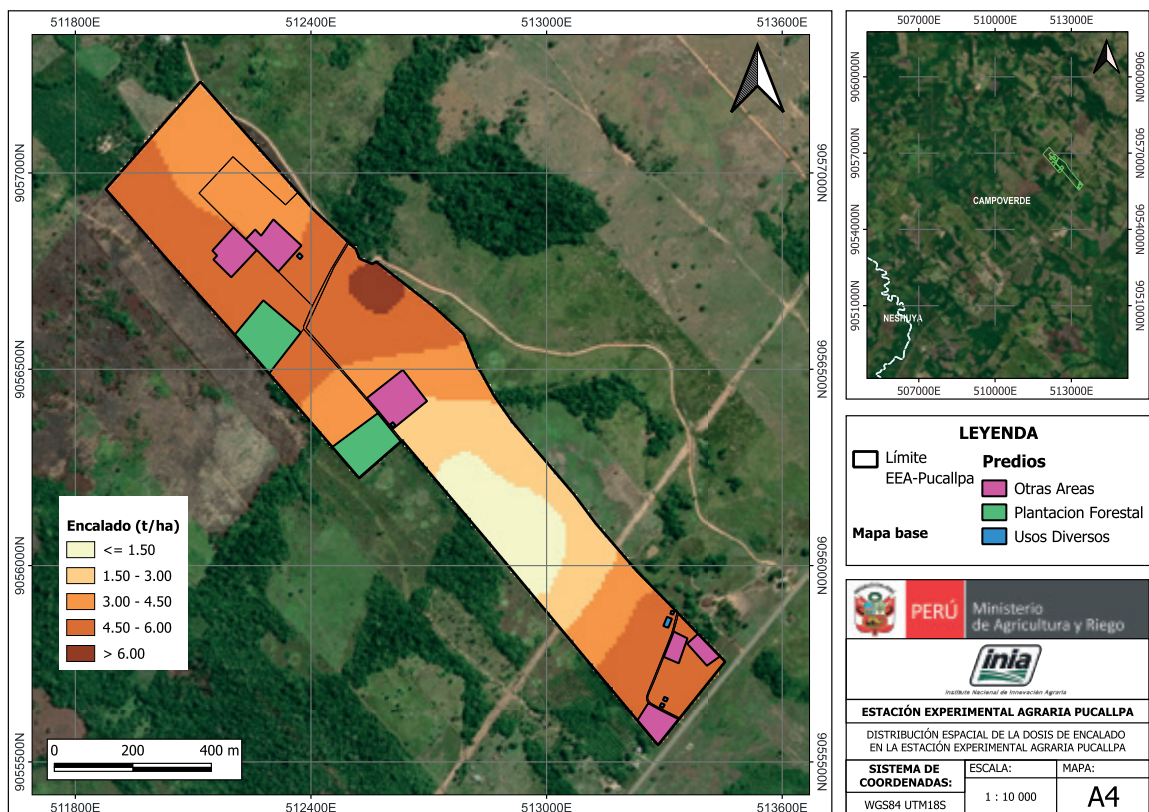


Figura 22. Mapa de variación espacial de la dosis de encalado

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

Los indicadores geoestadísticos del P-Bray del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 0.94 y $R^2 = 0.34$). Además, existe una alta variabilidad entre los valores de P del suelo con resultados entre 0.89 y 28.92 mg kg⁻¹. De esta manera, el requerimiento de fertilización fosforada (Fórmulas 1-8) sólo es posible realizarlo mediante un análisis de suelos sitio-específico. En este caso, se tomará como ejemplo el valor de 2.48 mg Kg⁻¹ (promedio obtenido eliminando los *outliers* superiores) para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de café. De esta manera, la dosis anual de fertilizantes para un cultivo de café manejado con fertilización convencional sería de 52.95 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico. Para este cálculo se debe considerar lo siguiente: 30 % de eficiencia de uso del fertilizante, 6 kg de P para incrementar 1 mg kg⁻¹ de P-Bray del suelo, incremento de 1.5 mg kg⁻¹ de P anual, 5.18 kg de P por tonelada de producción y un 35 % de requerimiento adicional para construcción de raíces y brotes nuevos. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento de P del cultivo de café y se construye fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo.

4.3. El pH del suelo

Los indicadores geoestadísticos para el pH del suelo resultaron en un valor de *Nugget* (C_0) muy bajo (0.02), lo que demuestra una baja variabilidad a microescala, es decir, el pH del suelo no cambia a corta distancia. Por su parte, el *Sill* ($C_0 + C$) también muestra valores muy bajos (0.06), lo que indica que a medida que incrementa la distancia sigue habiendo una baja variabilidad del pH del suelo. Asimismo, el RMSE del pH presentó un valor muy bajo, con un error o desviación promedio en las predicciones de ± 0.18 , lo que evidencia que el modelo de predicción espacial tiene un alto grado de ajuste con la variación espacial de los valores predichos. Sin embargo, el modelo presenta un R^2 muy bajo, con 30 % de variabilidad espacial del pH explicada por el modelo, esto ocurre porque los valores del pH cambian poco en el espacio y no hay suficiente variabilidad que explicar.

De esta manera, el análisis muestra que el pH del suelo en la EEA Pucallpa es una variable estable y tiene baja variación en el espacio (Figura 23). Por este motivo, es posible utilizar la media para la interpretación y recomendaciones en el área de estudio. Siendo el valor medio de pH de 4.80 ± 0.31 , calificado como fuertemente ácido. En este rango, los suelos presentan problemas severos a nivel de disponibilidad de macro y micronutrientes, actividad microbiana y crecimiento radicular.

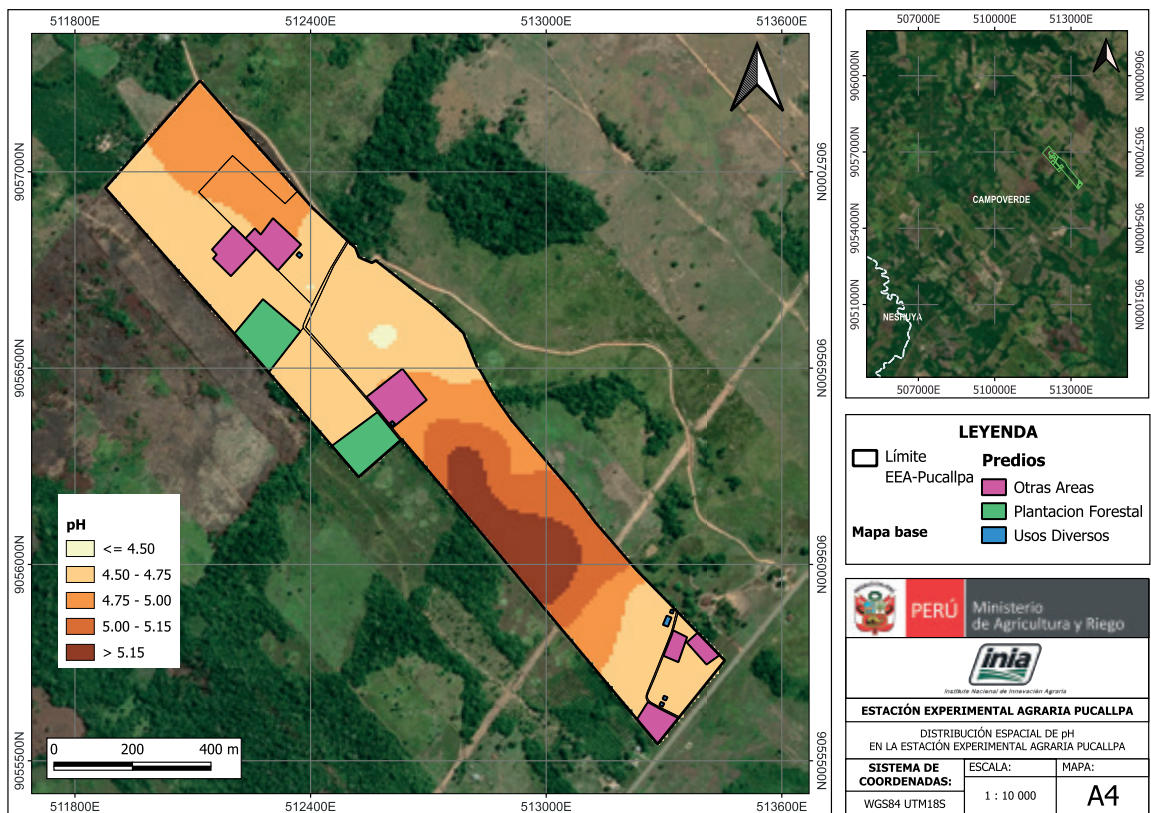


Figura 23. Mapa de variación espacial del pH

En particular, existe un comportamiento espacial similar entre el pH y el nitrógeno total del suelo (Figura 24), con valores medios de este nutriente muy bajos 0.09 ± 0.02 %. Esta característica sugiere que el pH estaría afectando negativamente la actividad microbiana y la mineralización de la materia orgánica. También, a este nivel de pH disminuyen la actividad de las enzimas de tipo cellobiohidrolasas y xylanasas, que degradan componentes de la pared celular. Por este motivo, se recomienda la siembra de cultivos de cobertura con plantas leguminosas, que permitan un aporte de sustancias nitrogenadas orgánicas fácilmente aprovechables o lábiles, y repoblar la flora rizosférica con microorganismos promotores del crecimiento (géneros *Pseudomonas* y *Bacillus*). Además, en la fertilización nitrogenada debe priorizarse las fuentes nítricas, ya que estas incrementan el pH rizosférico. Por otro lado, es fundamental la nutrición con molibdeno (Mo) quelatado, debido a que este micronutriente estimula la mayor actividad de la enzima nitrato reductasa y la asimilación del nitrógeno.

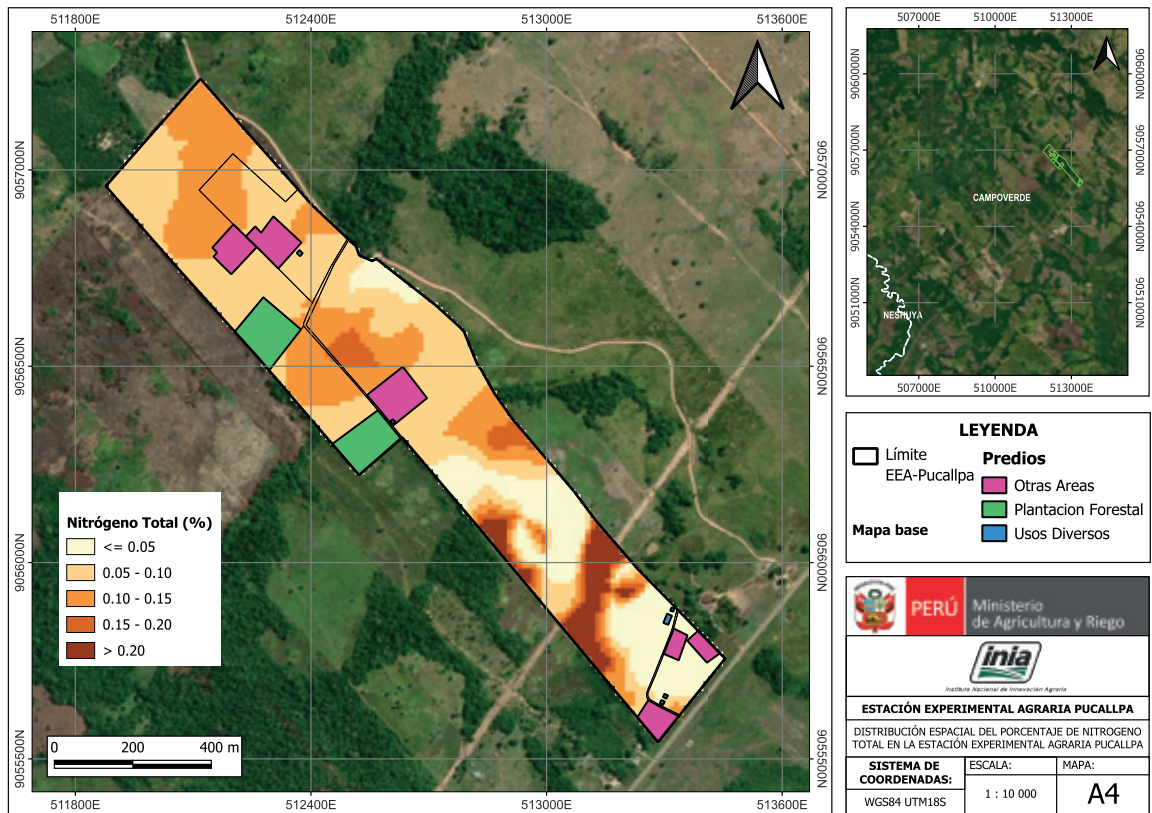


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno (N) total

En este nivel de pH, es imperativo seguir las recomendaciones del apartado 4.1 de este documento, debido a que el Ca estimula la división celular de las células radiculares y la ramificación de la exploración de raíces. Además, en complemento al efecto positivo del Ca en la formación de las paredes celulares de las microvellosidades de las raíces, el B cumple funciones similares y estimula la estabilidad de las enzimas ATPasa que modulan el transporte activo de nutrientes, principalmente el fósforo y potasio. La dosis recomendada de aplicación de ácido bórico es de 0.62 ppm por planta, vía drench.



5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Alegre, J. C., Cassel, D. K., y Bandy, D. E. Effects of land-clearing method and soil management on crop production in the Amazon. *Field Crops Research*, 24(1), 131-141. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90026-8](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90026-8)
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://doi.org/10.18359/rcin.5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford university press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1–10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J., Nina, S., García-Carmona, M., y Salazar, E. T. (2025). Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 1-13. <https://doi.org/10.3389/sjss.2025.13983>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>

- Condori-Ataupillco, T., Flores-Marquez, R., Quispe, K., Quispe-Rodriguez, J., Velásquez-Mantari, J., y Solórzano-Acosta, R. (2025). Biochar-Amended Soils: A Water-Saving Strategy for Quinoa Cultivation in the Andes. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1002/sae2.70036>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar- Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <https://repositorio.inia.gob.pe/>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138–1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Fageria, N. K., y Nascente, A. S. Management of soil acidity of south american soils for sustainable crop production. En D. L. Sparks, *Advances in Agronomy* (vol. 128, pp. 221-275). Department of Plant and Soil Sciences, University of Delaware. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. [dx.doi.org/10.14350/rig.54706](https://doi.org/10.14350/rig.54706)
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.

- International Organization of Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity*. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/01/92/19243.html>
- International Organization of Standardization. (1995). *Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method*. <https://www.iso.org/standard/19239.html>
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiúdos y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., D. A. Whitney, *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (vol. 29, pp. 39-54). ASA Special Publications
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11), 78-86. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barreuzeta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9-13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Teixeira, W. G., Alvarez V, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. 10.36783/18069657rbc20200078
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>

Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>

Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>



Instituto Nacional de Innovación Agraria







D. : Av. La Molina 1981, La Molina
T. : (511) 240-2400
www.gob.pe/inia

ISBN: 978-9972-44-196-7



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

      @INIAPeru