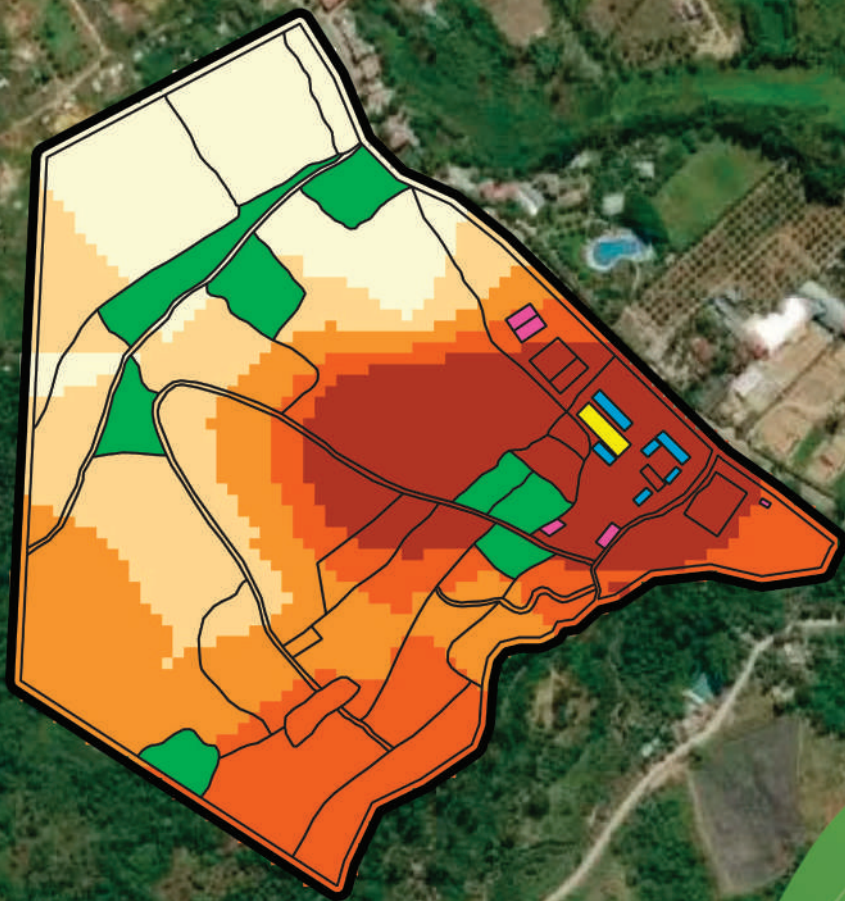


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Pichanaki



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 Pichanaki



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA PICHANAKI

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

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:

Febrero, 2026

Publicado:

Febrero, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-247-6

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 manual por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-01776

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejía-Maita, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Albert E. Fernández-Puquio, Lorena E. Romero-Chávez, Rodolfo J. Chuchon Remon, Joseph M. Cunyas-Camayo, Nene N. Granados-Dominguez, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña; Anthony L. Peralta-Guzmán / **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 Pichanaki	25
3.1. Ubicación de la EEA Pichanaki	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	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
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>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	36
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Pichanaki	57
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	57
4.1.1. Restricciones en la fertilidad por deficiencia de cationes básicos	57
4.1.2. Zonificación de la acidez intercambiable y estimación del requerimiento de cal	57
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	61
4.3. Aplicación de bioinsumos	63
5. Referencias bibliográficas	65



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 de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria 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.

En este contexto, resulta esencial superar las limitaciones de los diagnósticos convencionales, considerando que la heterogeneidad espacial de la fertilidad edáfica influye directamente en el rendimiento de los cultivos, el aprovechamiento de los insumos agrícolas y la sostenibilidad de los agroecosistemas, sobre todo en paisajes variables. Los métodos tradicionales basados en promedios o mediciones aisladas no logran representar dicha variabilidad, restringiendo la precisión de las decisiones agronómicas. Por ello, el uso de herramientas geoestadísticas y de sistemas de información geográfica (SIG) permite identificar y comprender los patrones espaciales del suelo, aportando bases técnicas para un manejo diferenciado, la conservación edáfica y la optimización de la fertilización.

El presente documento titulado “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Pichanaki” integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología del análisis geoespacial, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico detallado del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

Los suelos de la selva alta peruana presentan condiciones edáficas particulares, que derivan de su origen geológico, el régimen climático húmedo y la intensa dinámica de lixiviación de nutrientes. Dichas condiciones, generan procesos de acidificación, pérdida de bases de cambio y heterogeneidad en la fertilidad de los suelos, lo que limita la sostenibilidad de los sistemas agrícolas si no se implementan prácticas de manejo adecuadas (Solórzano et al., 2025).

En particular, en la Estación Experimental Agraria (EEA) Pichanaki predominan suelos Leptosol, Cambisol y Regosol éutricos en la sede principal, mientras que en el anexo se distinguen Cambisol dístico y Alisol háplico (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Asimismo, el clima se caracteriza por precipitaciones cercanas a 2000 mm anuales y temperaturas medias de 18 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025). Estas condiciones confieren a los suelos de la estación características como acidez elevada, baja capacidad de intercambio catiónico efectiva y concentraciones limitadas de calcio, magnesio y potasio, lo que restringe la saturación de bases y acentúa la toxicidad del aluminio en la rizosfera (Quispe et al., 2025).

Además, estos suelos ácidos muestran contenidos reducidos de fósforo disponible y materia orgánica, propiedades clave para la sostenibilidad edáfica en ambientes tropicales (Quispe et al., 2025). La combinación de acidez, deficiencia de nutrientes y alta lixiviación derivada de las lluvias intensas contribuye a la degradación química del suelo y limita la eficiencia del uso de fertilizantes (Sittthaphanit et al., 2009). Dichas limitaciones repercuten directamente en los cultivos estratégicos de la región, como el café, cacao y especies forestales, cuya productividad depende de estrategias de fertilización y encalado adaptadas a la variabilidad espacial de las propiedades edáficas.

En función de las características particulares que presentan los suelos de la Estación Experimental Agraria Pichanaki, la evidencia científica señala la necesidad de aplicar una estrategia integral de manejo del suelo. Esta estrategia debe incluir la caracterización y elaboración de mapas de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante herramientas de geoestadística y mapeo digital; la identificación de los principales factores limitantes de la fertilidad, como el pH, la acidez intercambiable, el fósforo, las bases de cambio y la materia orgánica; así como el diseño de prácticas de manejo diferenciadas según zonas, tales como el encalado variable, la aplicación localizada de enmiendas orgánicas y la fertilización específica. La implementación de estas prácticas permitirá un uso más eficiente de los insumos agrícolas, el incremento de la productividad y una mejor resiliencia del suelo frente a la degradación (Heuvelink y Webster, 2022; McBratney et al., 2003; Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019).

En ese sentido, el presente documento tiene como objetivo brindar los lineamientos técnicos y prácticos para el diagnóstico, la zonificación y el manejo diferenciado de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria Pichanaki, considerando la variabilidad espacial de sus propiedades edáficas, para optimizar el uso de fertilizantes y enmiendas, mejorar la productividad de los cultivos y fortalecer la sostenibilidad y resiliencia de los suelos en condiciones de selva alta.



2. Principios fundamentales de análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación de análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante 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 (Quispe-Matos et al., 2025).

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 han 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 Pichanaki 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 su relación con 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 suelo, limita la absorción de nutrientes 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 (Quispe-Matos et al., 2025).

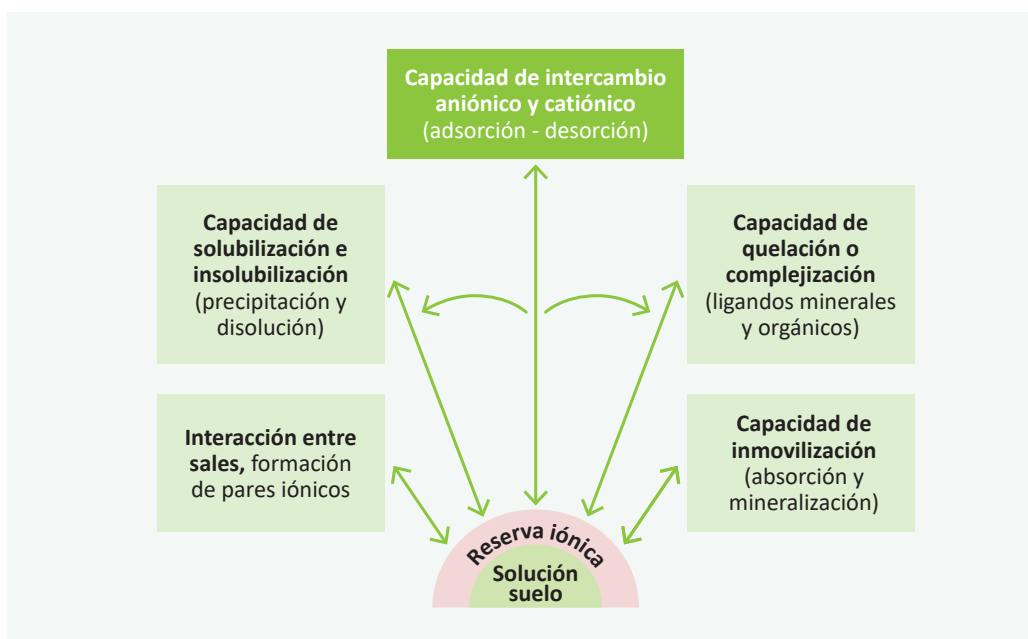


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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 capacidad de intercambio catiónico (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 (Quispe-Matos et al., 2025).

El pH del suelo es una de las variables más importantes en la toma de decisiones agronómicas, ya que permite identificar la necesidad de corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si se requiere la aplicación de cal o yeso agrícola para contrarrestar el exceso de Al^{3+} o Na^+ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio (Ca^{2+}) y son las principales herramientas para aumentar la saturación de Ca^{2+} y reducir la de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso pueden generar efectos positivos y negativos sobre las propiedades del suelo y la producción vegetal, principalmente a través de tres mecanismos: elevación del pH, incremento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S) (Espinosa y Molina, 1999). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2.

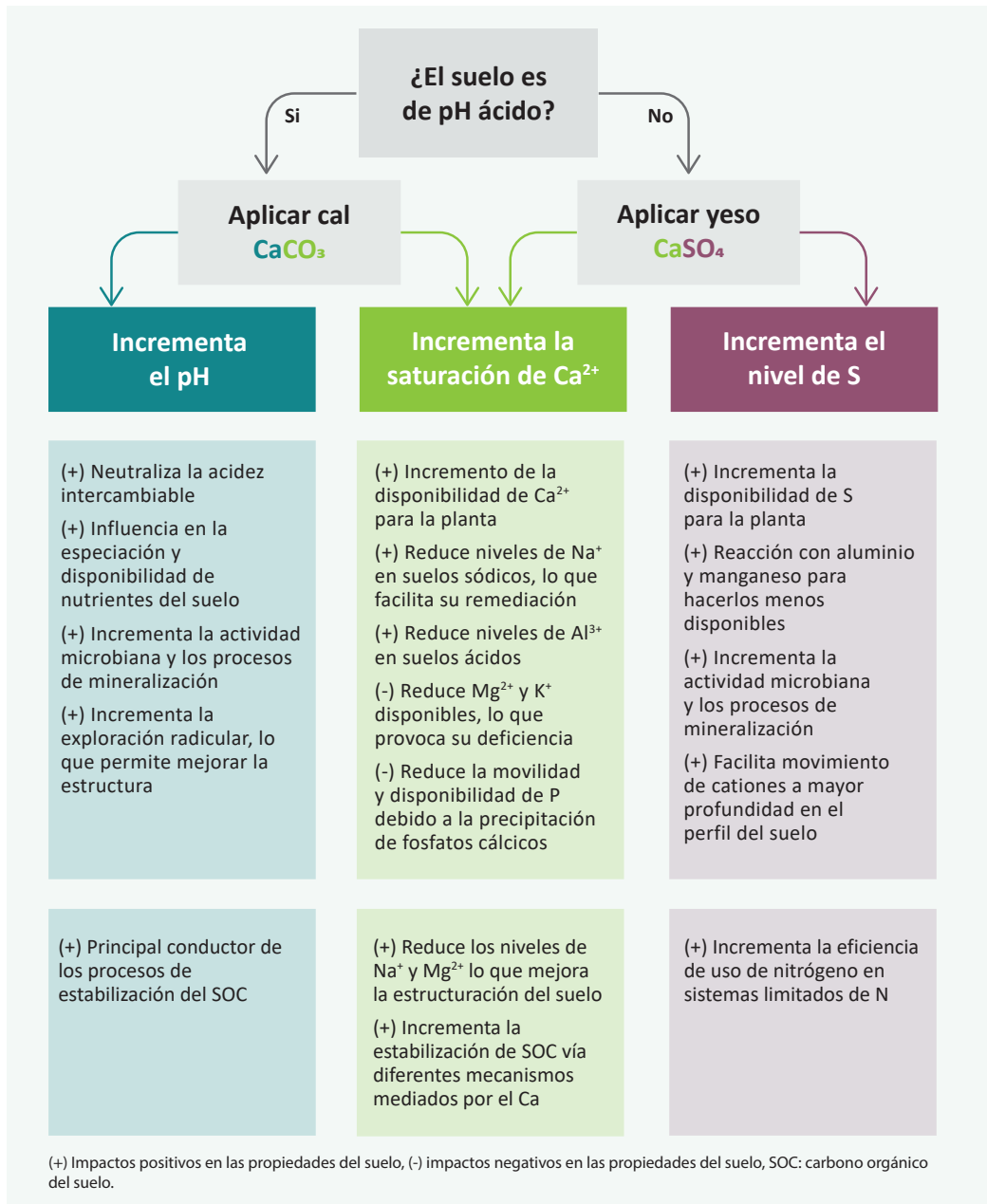


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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 de 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 (Quispe-Matos et al., 2025).

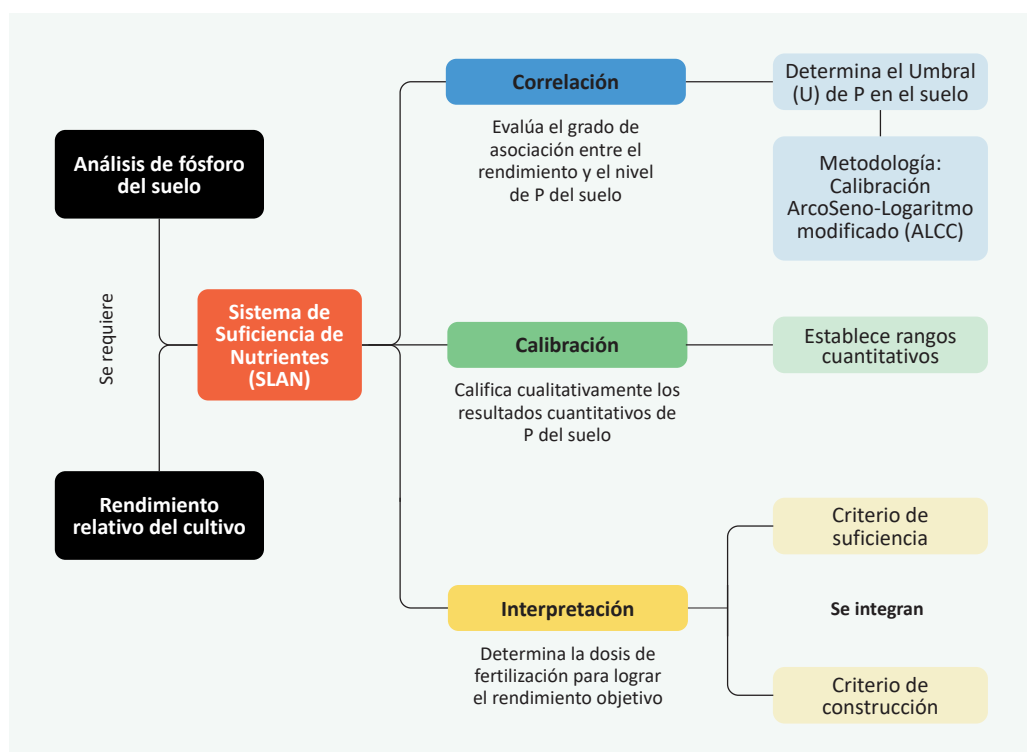


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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, para calcular el requerimiento de mantenimiento y de construcción de fertilidad, es necesario conocer previamente la eficiencia de uso de nutrientes y la necesidad de construcción de fertilidad (NCF), las cuales dependen de las características propias del suelo donde se realiza el estudio.

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 60 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1.2 \text{ t ha}^{-1}$$

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 60 % 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:

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

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

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.

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

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

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 biomasa radicular y vegetativa, y 1.2 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios 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 aplica 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, 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.

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

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 %.

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

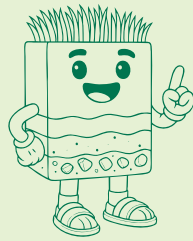
$$\text{RM de P} = \frac{5.59 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 18.63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de café es 18.63 kg por hectárea.

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, a lo cual se denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), 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.

$$\text{Dosis de fertilización kg de P ha}^{-1} = RM + RC \quad \dots(8)$$

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

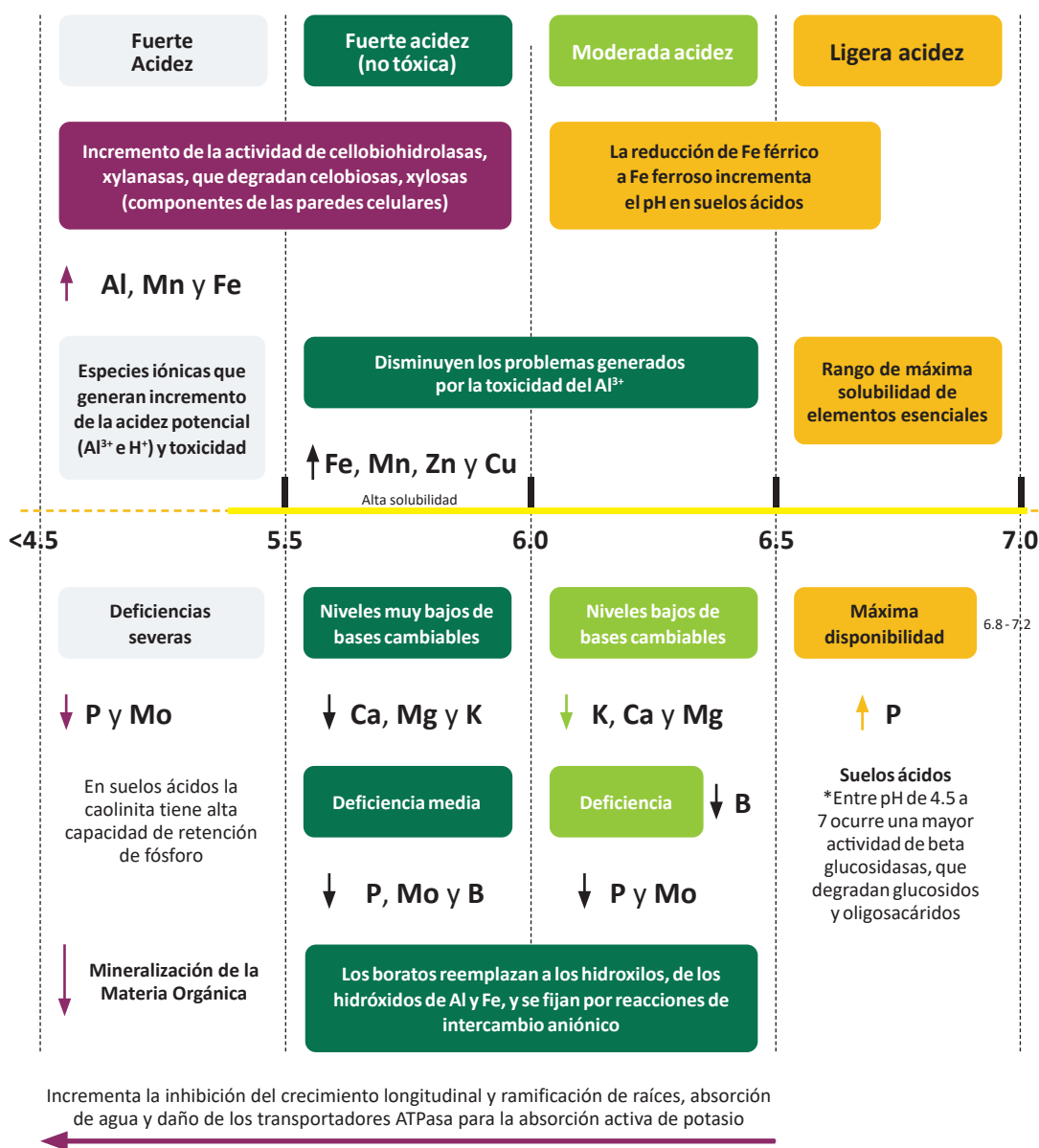
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 14 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 23 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

La medición del pH en suelos 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 presenta un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



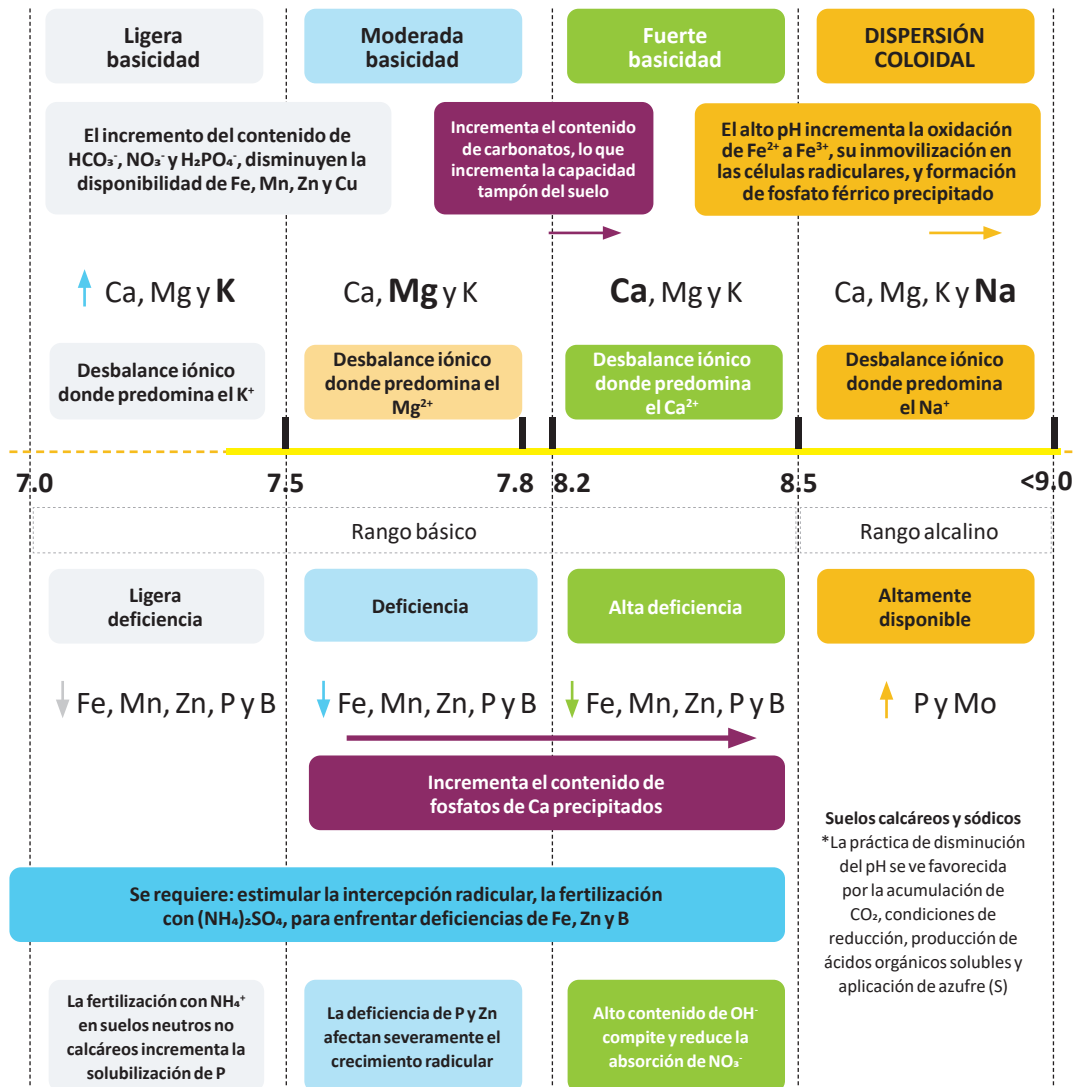


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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.

Pro Suelos y Aguas



3. Muestreo y análisis de suelos de la EEA Pichanaki

3.1. Ubicación de la EEA Pichanaki

La sede de la EEA Pichanaki presenta suelos de tipo Leptosol éútrico-Cambisol éútrico-Regosol éútrico. En el anexo San Ramón, el tipo de suelo es de Cambisol dístrico-Alisol háplico (INRENA, 1996). Esta estación cuenta con tres centros experimentales (Pichanaki, Rondal y Puerto Bermúdez) y el anexo San Ramón, con una extensión total de 429.66 ha y los cultivos priorizados son café (*Coffea arabica* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.) y especies forestales.

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Junín. La sede de la EEA Pichanaki se encuentra en el distrito de Pichanaki, en la provincia de Chanchamayo, en el departamento de Junín (Figura 5), ubicada a 525 m s. n. m. El clima de la zona es típico de selva alta, con precipitaciones anuales de hasta 2000 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 18 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

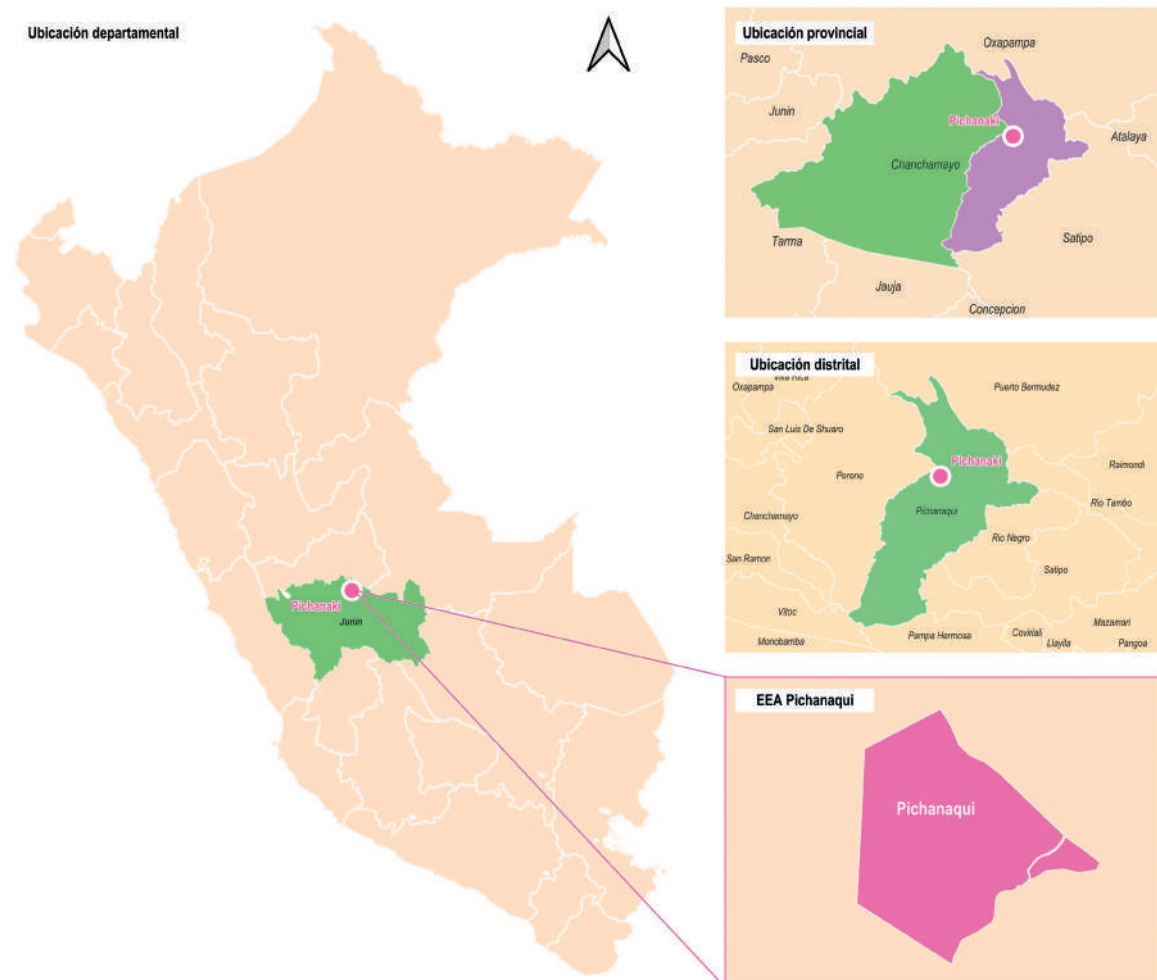


Figura 5. Ubicación EEA Pichanaki

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Pichanaki, 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).

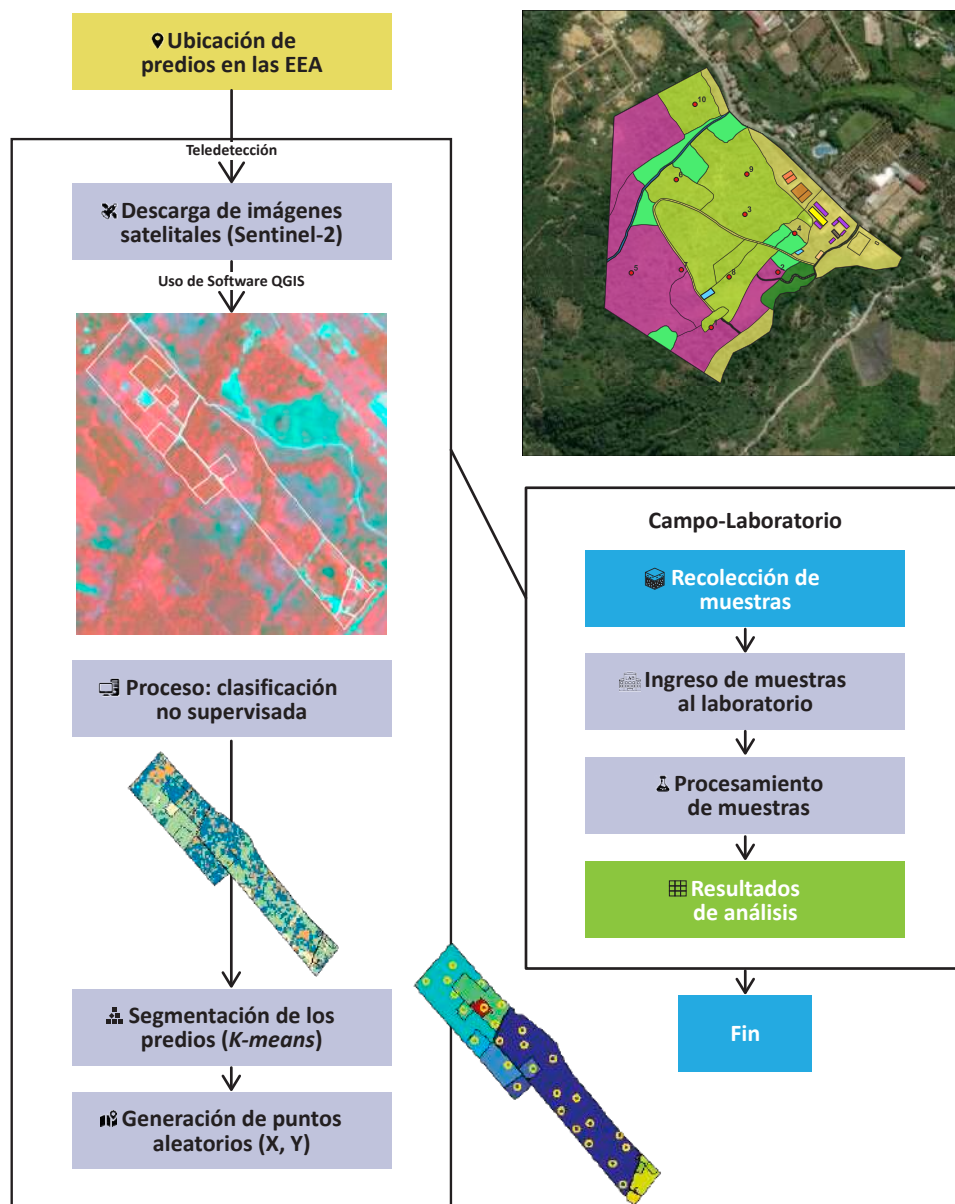


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel 2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada *K-means*. Luego, se usó 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 de R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado (Figura 7). Se identificaron en total 10 puntos de muestreo de suelos.

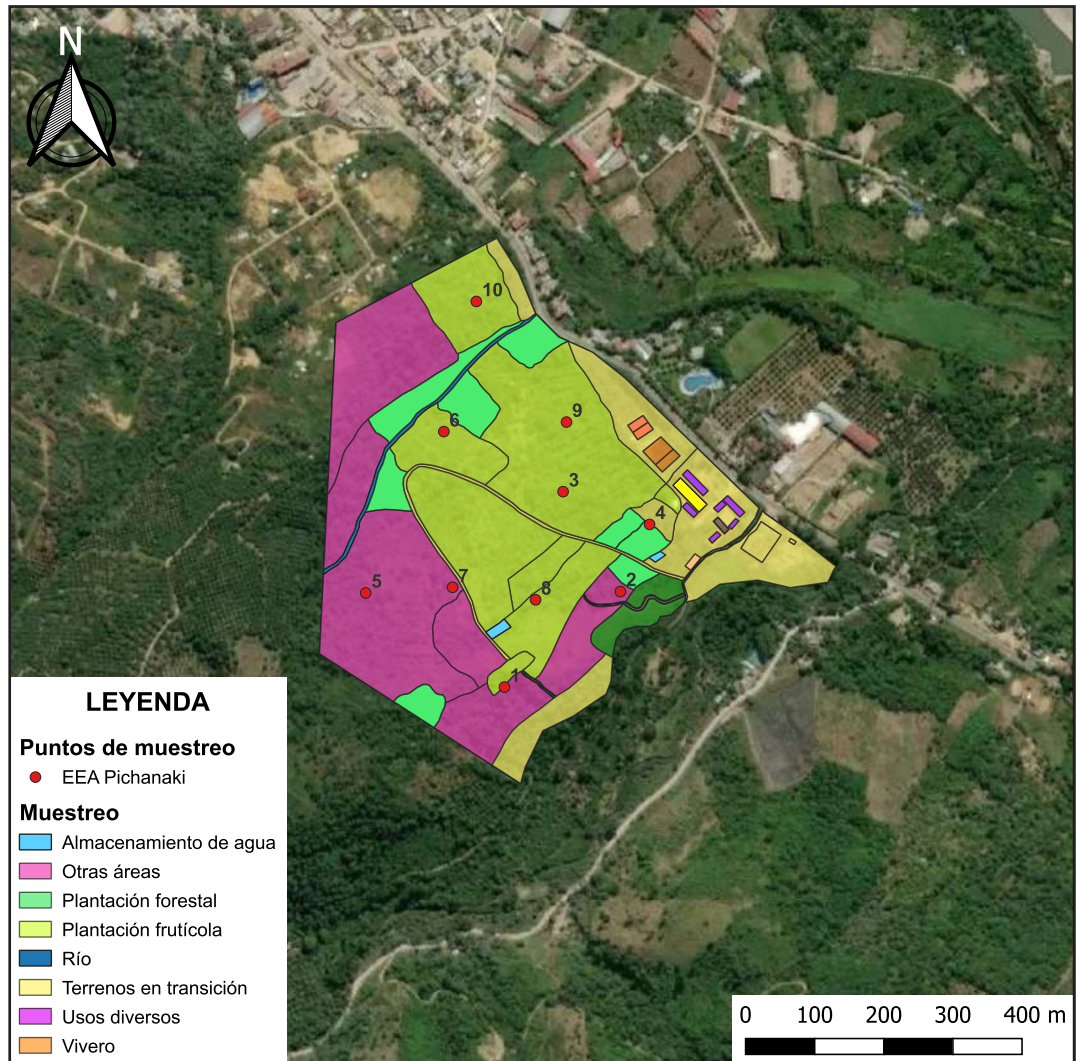


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Pichanaki

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 10 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes, y se encuentran ilustrados en la Figura 8:

- Retirar la hojarasca y vegetación de la superficie del suelo.
- Limpiar y desinfectar la superficie de la pala.
- Hacer un hoyo en forma de “V” de 30 cm de profundidad y área de 20 x 20 cm aproximadamente.
- 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.
- Eliminar los residuos de los bordes de la pala para evitar contaminación.
- Depositar la muestra en un balde o contenedor.
- Desterronar la muestra y eliminar raíces, restos orgánicos u otros contaminantes.
- Tomar una porción aproximada de 1 kg en dos bolsas de plástico, colocando entre estas la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra (adaptado de Díaz-Chuquizuta et al., 2025)

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliar de la EEA San Ramón para su procesamiento. El secado de las muestras a 35°C durante 48 horas fue el primer pretratamiento realizado. Posteriormente, 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 for 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 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 corresponden a las muestras de suelos recolectadas en la EEA Pichanaki. Los suelos presentan, en promedio, una textura franco-arcillosa (25.56 % de arena, 33.64 % de limo, 40.80 % de arcilla), con variabilidad moderada (CV entre el 18.16 % a 40.75 %) y distribución cercana a la simetría (*skewness* entre -0.94 a 0.82). Este patrón refleja cierta heterogeneidad en la composición granulométrica, lo que puede influir en la retención de agua y nutrientes y otorgar al suelo una capacidad media de almacenamiento de humedad.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Skewness	Mín.	Mediana	Máx.
Arena	%	25.56	10.42	40.75	0.31	14.96	22.96	40.96
Limo	%	33.64	6.11	18.16	-0.94	21.64	33.64	39.64
Arcilla	%	40.80	8.69	21.31	0.82	29.40	41.40	59.40
CE	dS m ⁻¹	0.03	0.03	90.74	1.93	0.01	0.02	0.10
pH	und	4.73	0.44	9.25	-0.11	4.05	4.70	5.31
MO	%	1.90	0.41	21.85	-0.46	1.01	1.84	2.63
N Total	%	0.09	0.02	21.66	-0.45	0.05	0.09	0.13
P disp.	mg kg ⁻¹	2.69	0.40	15.03	-0.47	2.04	2.69	3.21
K disp.	mg kg ⁻¹	41.95	12.52	29.84	1.25	30.51	40.05	68.10
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	0.68	0.31	45.58	-0.89	0.21	0.81	1.01
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	0.12	0.05	39.86	1.22	0.07	0.10	0.21
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0.02	0.01	29.88	-0.09	0.01	0.02	0.03
Al ³⁺ + H ⁺	cmol kg ⁻¹	1.25	0.83	66.89	0.27	0.10	1.05	2.61
CICe	cmol kg ⁻¹	2.07	0.86	41.55	0.40	0.92	1.84	3.52
PBI	%	44.42	24.24	54.55	0.83	12.66	35.96	91.07
PAI	%	55.58	24.24	43.61	-0.83	8.93	64.04	87.34
Cu	mg kg ⁻¹	0.34	0.40	118.72	1.80	0.11	0.14	1.21
Fe	mg kg ⁻¹	909.02	495.04	54.46	-0.51	154.70	1121.85	1507.40
Zn	mg kg ⁻¹	0.29	0.21	71.21	2.36	0.15	0.20	0.84
Mn	mg kg ⁻¹	5.06	2.89	57.12	-0.02	0.84	5.13	8.94

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, CICe: capacidad de intercambio catiónico, CV: coeficiente de variación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, Mín.: valor mínimo, Máx.: valor máximo, PBI: Porcentaje de bases intercambiables, PAI: Porcentaje de acidez intercambiable, SD: desviación estándar, *Skewness*: coeficiente de asimetría.

El pH del suelo es fuertemente ácido (4.73 ± 0.44 , CV = 9.25 %), con distribución casi simétrica ($skewness = -0.11$), lo cual es característico de suelos lixiviados y con baja saturación de bases. Esta condición puede restringir la disponibilidad de nutrientes esenciales y favorecer la solubilidad de elementos tóxicos como el Al^{3+} . En efecto, se observa un nivel de acidez intercambiable promedio de $1.25 \text{ cmol kg}^{-1}$ (CV = 70.47 %), con valores extremos de hasta $2.61 \text{ cmol kg}^{-1}$, lo que representa un factor limitante para el desarrollo radicular de los cultivos.

El contenido de materia orgánica (MO) es bajo ($1.90 \% \pm 0.41$, CV = 21.85 %), acompañado de un nivel reducido de N total (0.09 %, CV = 21.66 %), ambos con distribución cercana a la simetría. Estos valores reflejan cierta limitación en la fertilidad natural y la disponibilidad del N, lo que sugiere la posibilidad de mejorar la disponibilidad de nutrientes mediante prácticas de manejo orgánico.

La conductividad eléctrica (CE = $0.03 \text{ dS m}^{-1} \pm 0.03$) es muy baja, aunque con alta variabilidad (CV = 90.74 %) y valores puntuales de hasta 0.10 dS m^{-1} . Esto indica ausencia de problemas de salinidad generalizada, aunque con excesiva pérdida de bases intercambiables por lixiviación.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de P-Bray (2.69 mg kg^{-1}) y potasio intercambiable ($0.02 \text{ cmol kg}^{-1}$) son bajos, con variabilidad moderada (CV de 15.03 y 29.88 %), lo que evidencia deficiencia de estos nutrientes en la mayoría de los sitios evaluados. El calcio y magnesio presentan valores igualmente reducidos (0.68 y $0.12 \text{ cmol kg}^{-1}$, respectivamente) y confirman la baja saturación de bases. La capacidad de intercambio catiónico ($2.07 \text{ cmol kg}^{-1}$, CV = 41.55 %) es baja, y está dominada por acidez intercambiable, lo que restringe la capacidad de reserva de nutrientes. Esto se refleja en los porcentajes de participación catiónica, donde predomina la acidez intercambiable (PAI = 55.58 %) sobre las bases (PBI = 44.42 %), confirmando un perfil ácido con baja fertilidad.

En cuanto a los micronutrientes, se observa una elevada concentración de hierro ($909.02 \text{ mg kg}^{-1}$, CV = 54.46 %) y manganeso (5.06 mg kg^{-1} , CV = 57.12 %), ambos con alta variabilidad, lo que puede derivar en posibles desbalances nutricionales. El zinc (0.29 mg kg^{-1}) y el cobre (0.34 mg kg^{-1}) presentan concentraciones bajas a moderadas, también con alta dispersión, lo que sugiere la necesidad de monitorear su disponibilidad.

En resumen, los suelos de la EEA Pichanaki se caracterizan por una textura moderadamente variable, una acidez elevada con presencia de acidez intercambiable, baja saturación de bases y una fertilidad química limitada, tanto en macro como en micronutrientes. Bajo estas condiciones, se recomienda la aplicación de enmiendas calcáreas para elevar el pH y reducir la acidez intercambiable. Además, se sugiere el uso de prácticas de manejo que incrementen el contenido de materia orgánica y mejoren la disponibilidad de fósforo, potasio y micronutrientes, con el fin de sostener la productividad agrícola en esta zona, como se ampliará en la sección 4.

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 representativas 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 los puntos de muestreo 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 (ej. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, 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 los datos:** realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y evaluar la dispersión mediante la desviación estándar. Asimismo, emplear diagramas de caja para identificar 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 (ej. 5 m x 5 m, dependiendo de la resolución deseada).
- f. Generar el índice de Moran (fórmula 9) y el p-valor.

$$I = \frac{1}{n} \sum ij \dots(9)$$

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

- a. Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- b. Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- c. 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).
- d. Calcular la proporción **Sill-nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

- a. Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- b. Seleccionar la variable y el modelo ajustado.
- c. Seleccionar el método de interpolación: *kriging* ordinario.
- d. Generar el mapa rasterizado.
- e. Exportar el mapa en formato **GeoTIFF** 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** se debe activar la opción de validación cruzada o *cross validation*. El complemento evalúa el error mediante los siguientes métodos:

- a. **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).

Donde:

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

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. **Coefficiente 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 de la EEA Pichanaki se presentan en la Tabla 3. Las variables con mayor ajuste espacial fueron el pH ($R^2 = 0.68$), Mg^{2+} intercambiable ($R^2 = 0.53$), Ca^{2+} ($R^2 = 0.52$) y Cu ($R^2 = 0.51$). De forma similar, el PAI ($R^2 = 0.51$), limo ($R^2 = 0.50$) y CE ($R^2 = 0.50$) mostraron dependencias espaciales moderadas-altas que permiten su cartografía con confianza aceptable. Un segundo grupo con dependencia espacial moderada incluye arena ($R^2 = 0.495$), K ($R^2 = 0.486$), $Al^{3+} + H^+$ ($R^2 = 0.486$) y Zn ($R^2 = 0.484$).

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

Variable	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Gaussian</i>	1.577	4.293	347.478	13.472	0.495
Limo	<i>Exponential</i>	0.000	1.412	307.837	29.717	0.502
Arcilla	<i>Gaussian</i>	0.709	3.295	347.478	2.041	0.336
pH	<i>Linear</i>	0.000	0.301	307.810	0.010	0.680
CE	<i>Exponential</i>	0.001	0.007	307.837	0.119	0.497
MO	<i>Gaussian</i>	0.050	0.229	347.478	0.774	0.406
N total	<i>Gaussian</i>	0.000	0.001	347.478	0.053	0.365
P disp.	<i>Exponential</i>	0.073	0.348	347.478	0.384	0.169
K disp.	<i>Gaussian</i>	0.006	0.157	272.183	0.400	0.486
$Al^{3+} + H^+$	<i>Gaussian</i>	0.006	0.157	347.478	0.400	0.486
Ca^{2+}	<i>Exponential</i>	0.076	0.391	306.803	0.722	0.518
Mg^{2+}	<i>Exponential</i>	0.001	0.027	347.478	0.051	0.532
K ⁺	<i>Gaussian</i>	0.001	0.004	307.837	0.006	0.114
CICe	<i>Linear</i>	0.566	0.592	307.825	0.014	0.135
PBI	<i>Gaussian</i>	1.281	1.564	271.984	1.217	0.072
PAI	<i>Exponential</i>	0.000	0.992	271.984	38.338	0.505
Cu	<i>Gaussian</i>	0.045	0.065	307.616	1.018	0.508
Fe	<i>Gaussian</i>	1.946	7.825	269.391	2.413	0.215
Zn	<i>Gaussian</i>	0.017	0.021	269.391	0.786	0.484
Mn	<i>Gaussian</i>	0.340	0.399	269.391	0.765	0.042

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, PAI: Porcentaje de acidez intercambiable, PBI: Porcentaje de bases intercambiables.

Cabe señalar, que los RMSE reportados son útiles para evaluar la precisión interna del *kriging*, pero no son directamente comparables entre variables con unidades y rangos distintos. Por ello, variables como pH, Mg^{2+} , Ca^{2+} y Cu, por su elevado R^2 y consistencia en el modelo, constituyen candidatas preferentes para la elaboración de mapas de fertilidad y la identificación de limitantes locales. En cambio, propiedades con bajo ajuste (PBI, Mn, K^+) requieren mayor densidad de muestreo, transformaciones o inclusión de covariables, o bien la incorporación de información auxiliar (sensores proximales, variables topográficas) para mejorar su cartografía.

En conjunto, los resultados respaldan el uso de técnicas geoestadísticas en la EEA Pichanaki para la zonificación edáfica y el diseño de unidades de manejo diferenciado. No obstante, la precisión y el tamaño óptimo de las zonas dependerán de la variable de interés: las más predecibles permiten diseñar estrategias específicas de fertilización y enmienda, mientras que las menos predecibles demandan muestreos y análisis complementarios antes de tomar decisiones de manejo en campo.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas interpolados de las propiedades físicas y químicas del suelo en la EEA Pichanaki (Figuras 9-27) evidencian patrones espaciales claros en variables edáficas clave para el manejo agronómico. Entre ellas destacan el pH, el Mg^{2+} , el Ca^{2+} , el Cu y el PAI, todas con alta predictibilidad espacial y relevancia directa en procesos de acidez, toxicidad por aluminio, fertilidad química y disponibilidad de micronutrientes. Estas variables permiten definir zonas de manejo diferenciado para la aplicación de cal, la corrección de deficiencias nutricionales y la planificación de fertilización específica, facilitando estrategias más eficientes y sostenibles.

Por otro lado, variables como limo, arena, arcilla y materia orgánica, con dependencia espacial moderada, aportan información sobre procesos ligados a la retención de agua, estructura del suelo y dinámica de nutrientes. En contraste, propiedades con baja predictibilidad, como el P ($R^2 = 0.169$), el PBI ($R^2 = 0.072$), el Mn ($R^2 = 0.042$) y el K^+ ($R^2 = 0.114$), requieren mayor densidad de muestreo o el uso de covariables para generar mapas confiables. En conjunto, la representación espacial de estas variables constituye una herramienta esencial para el diagnóstico edáfico y la zonificación productiva en la EEA Pichanaki.

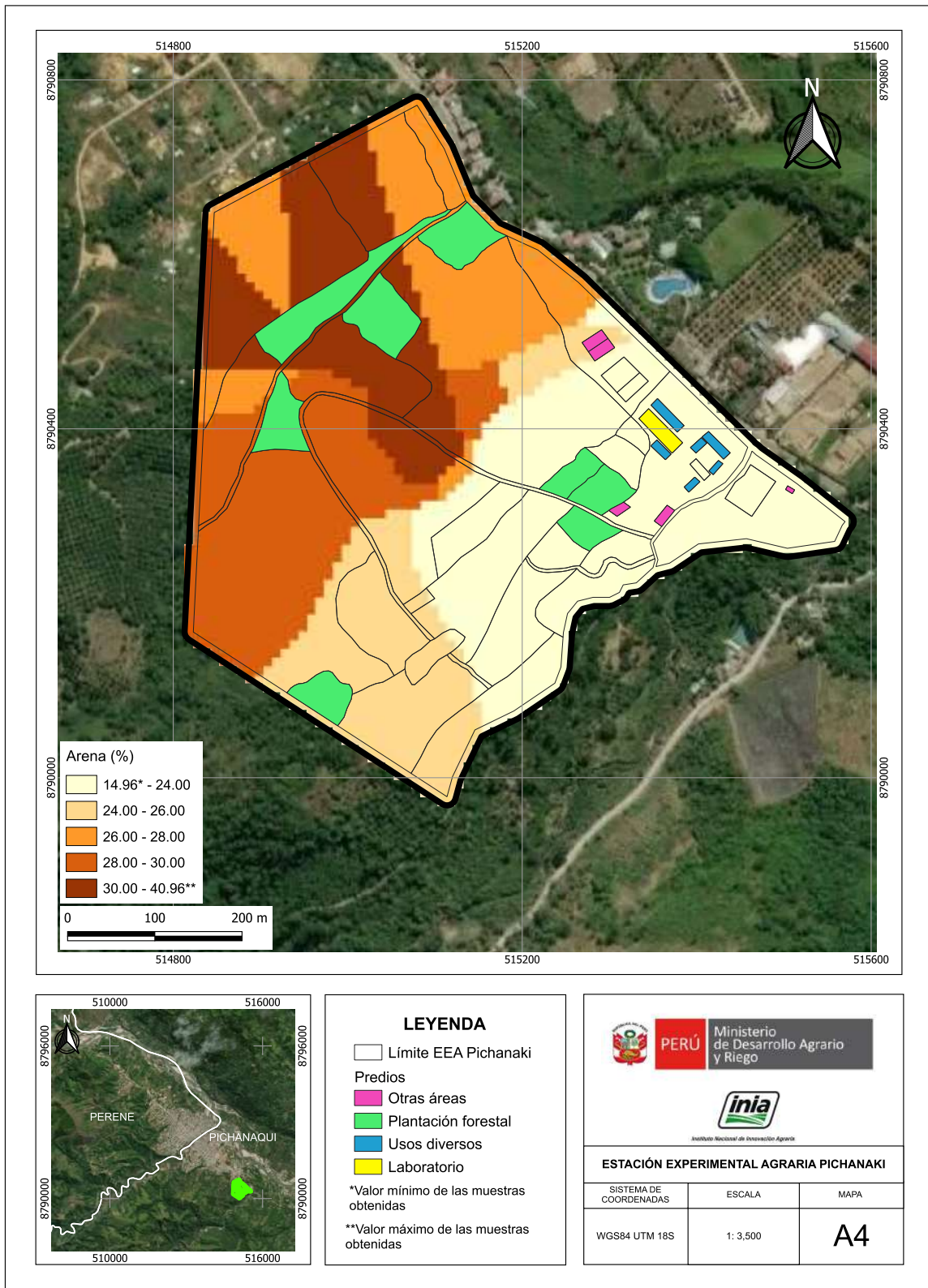


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

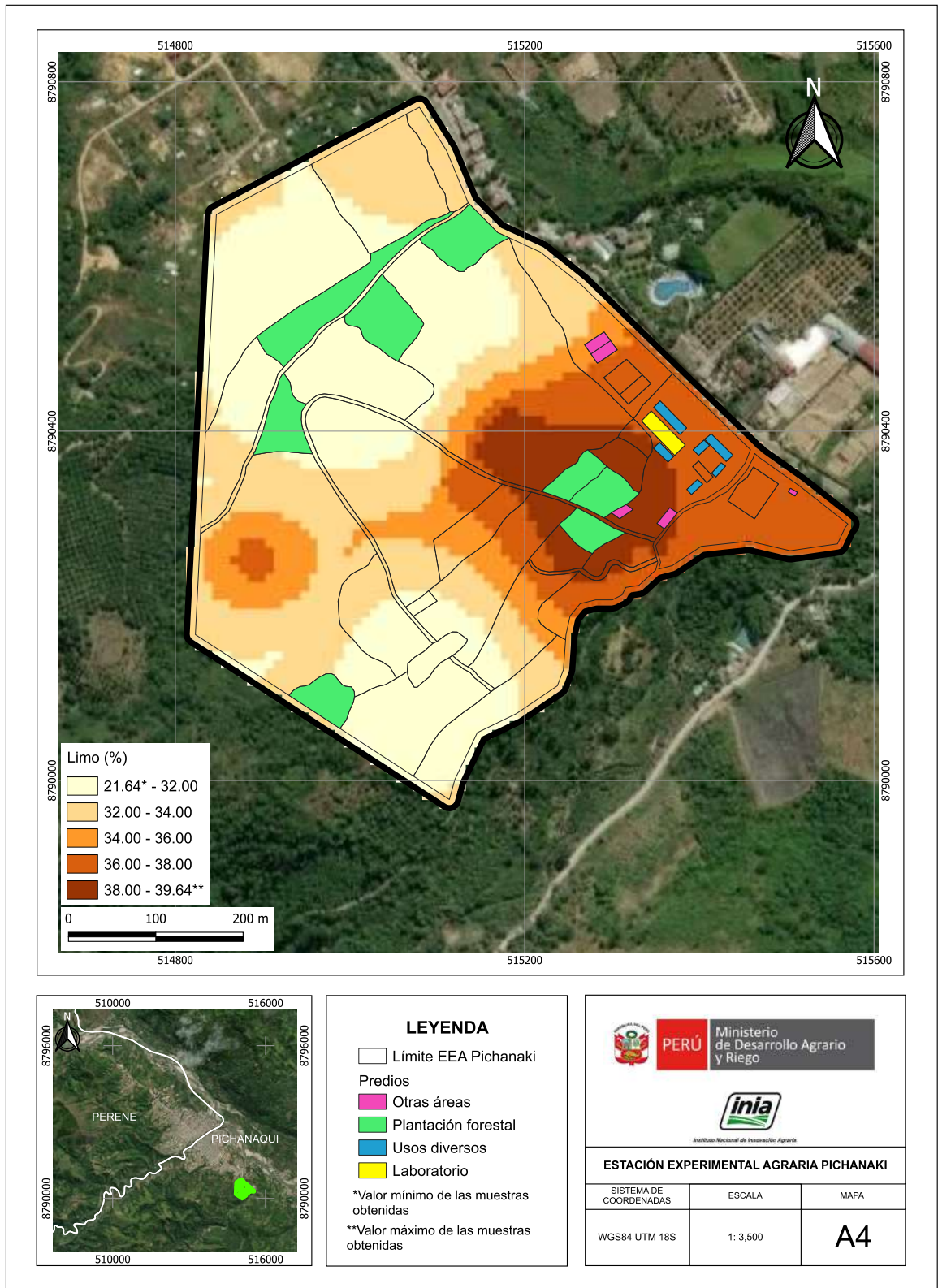


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

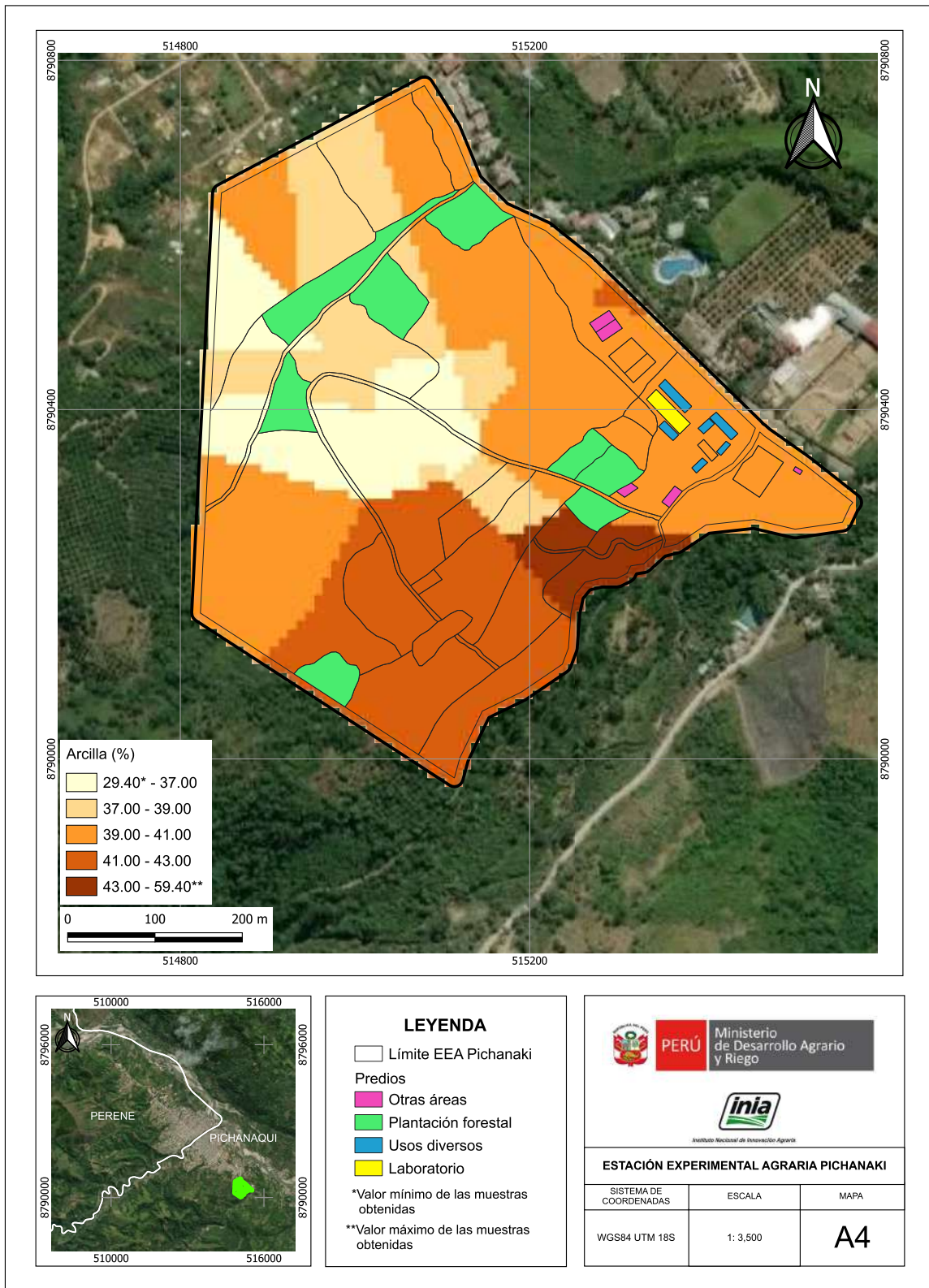


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

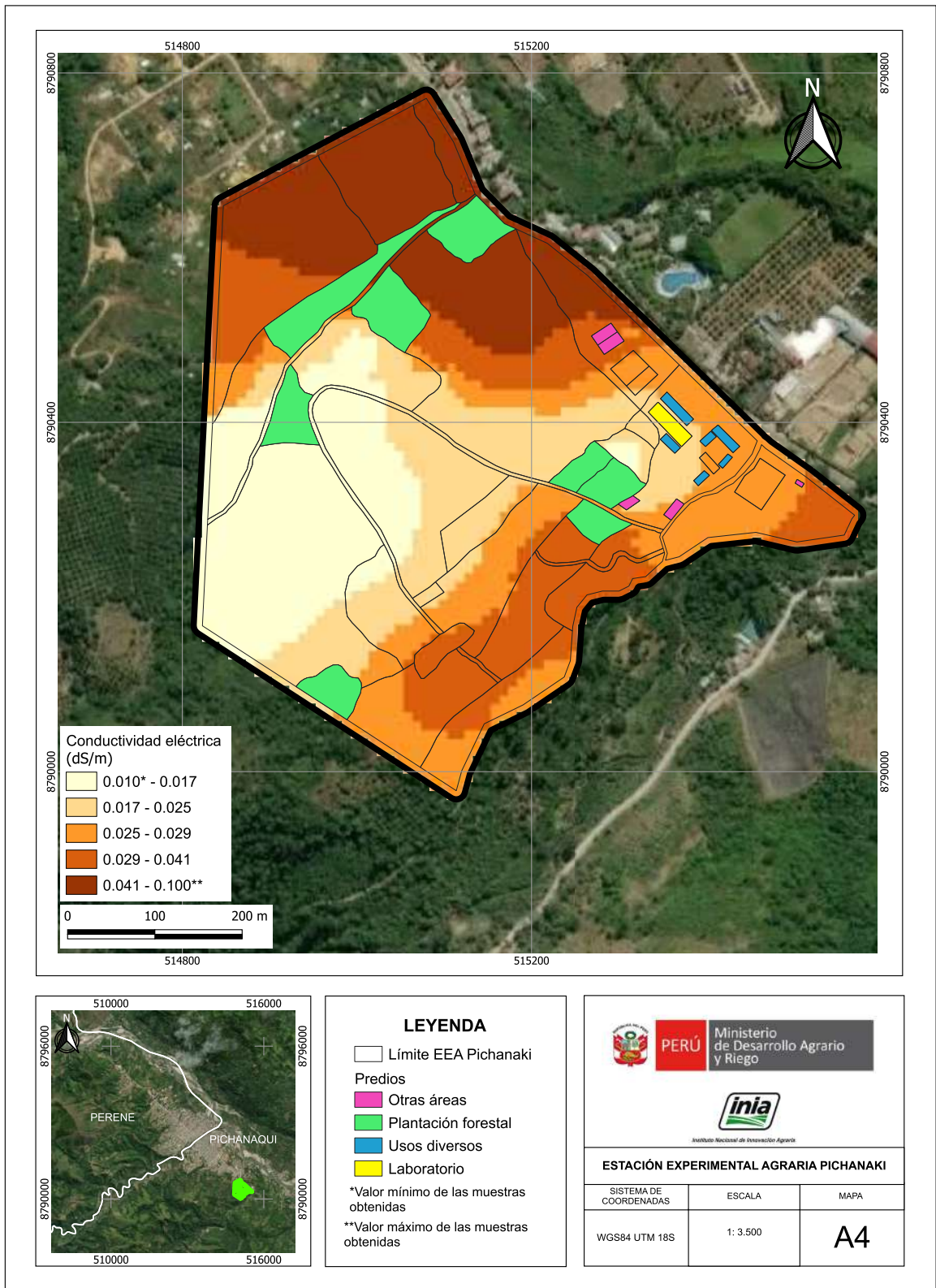


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica (CE)

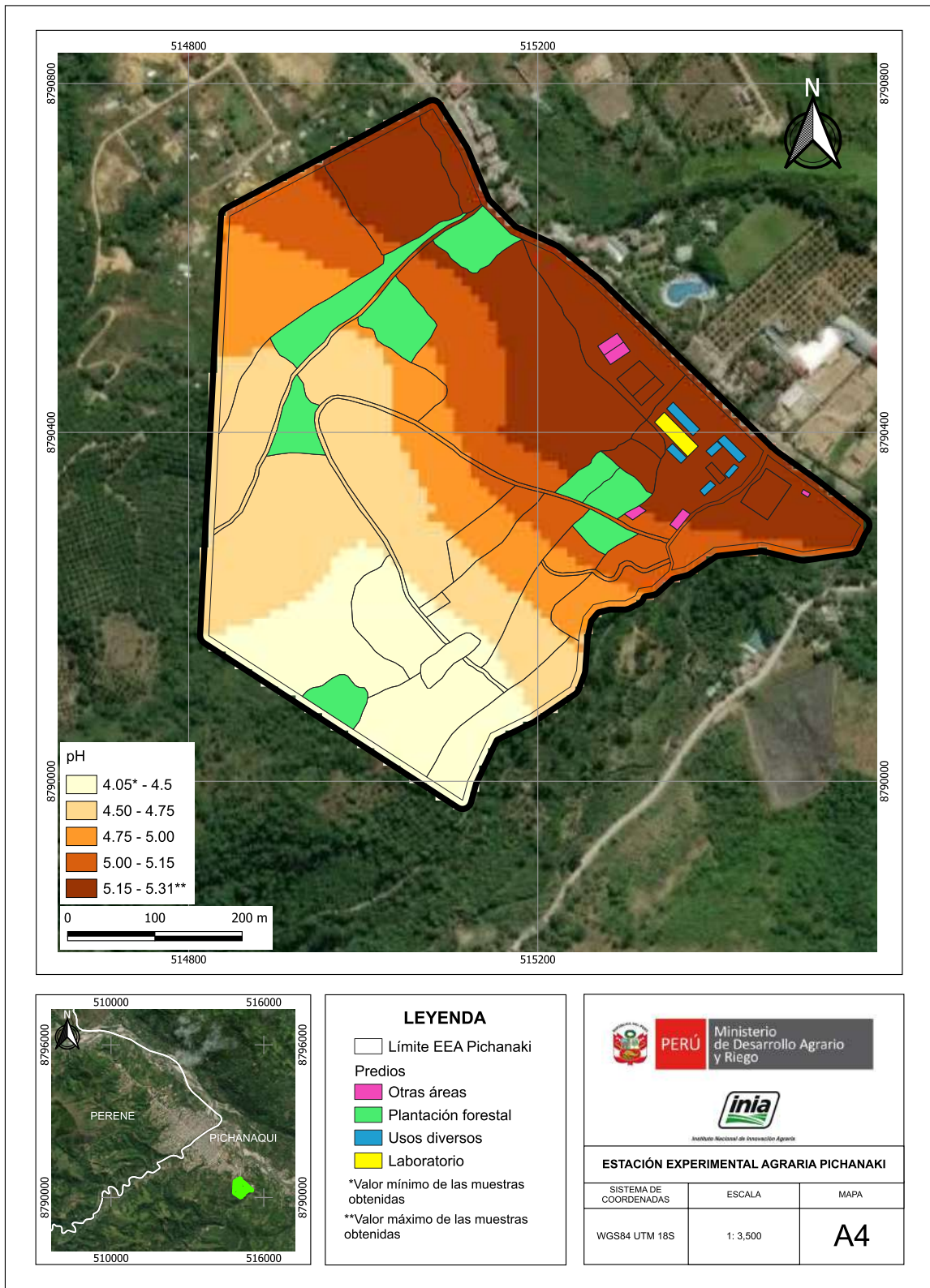


Figura 13. Mapa de variación espacial del pH

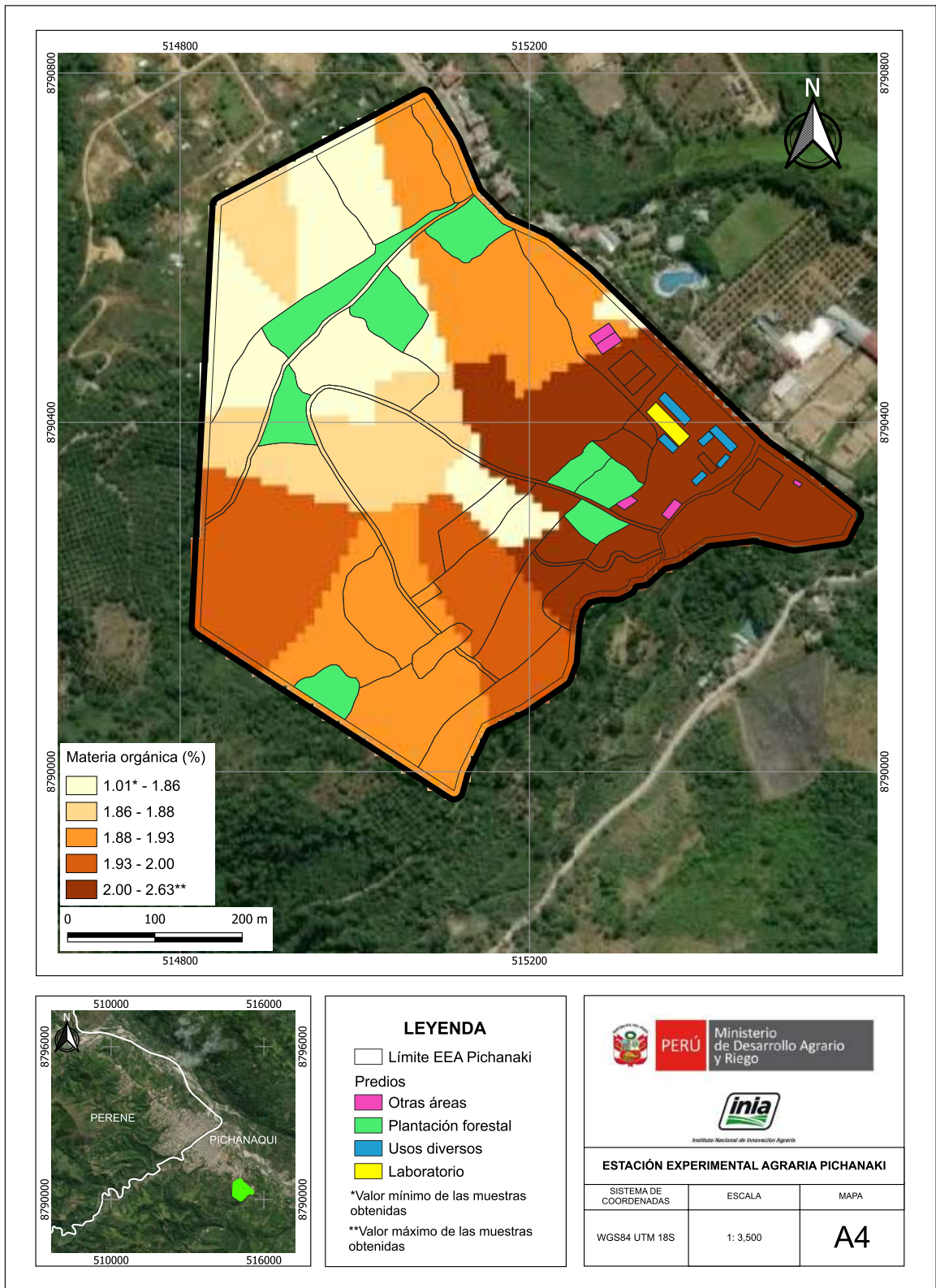


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de la materia orgánica (MO)

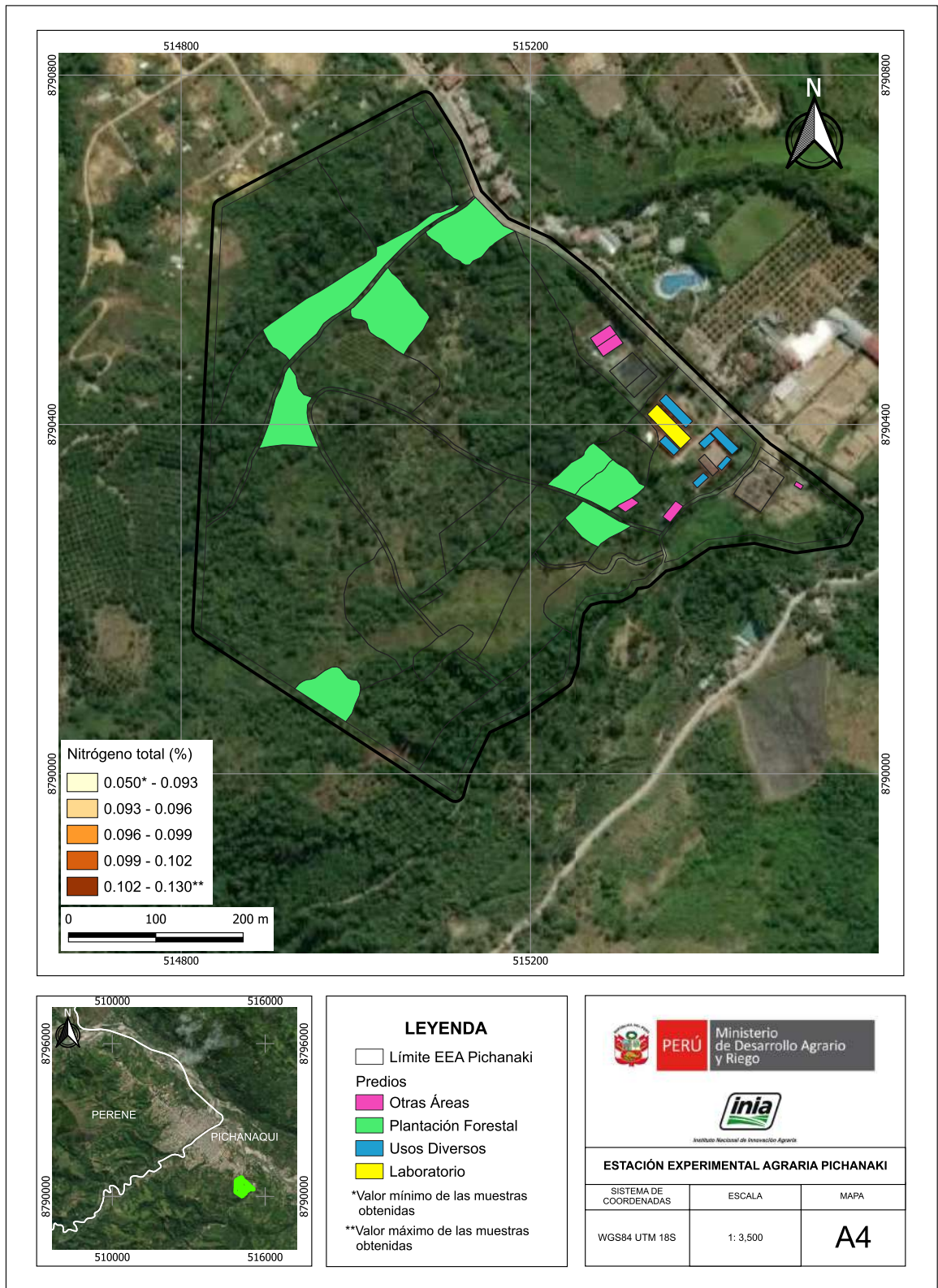


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno (N) total

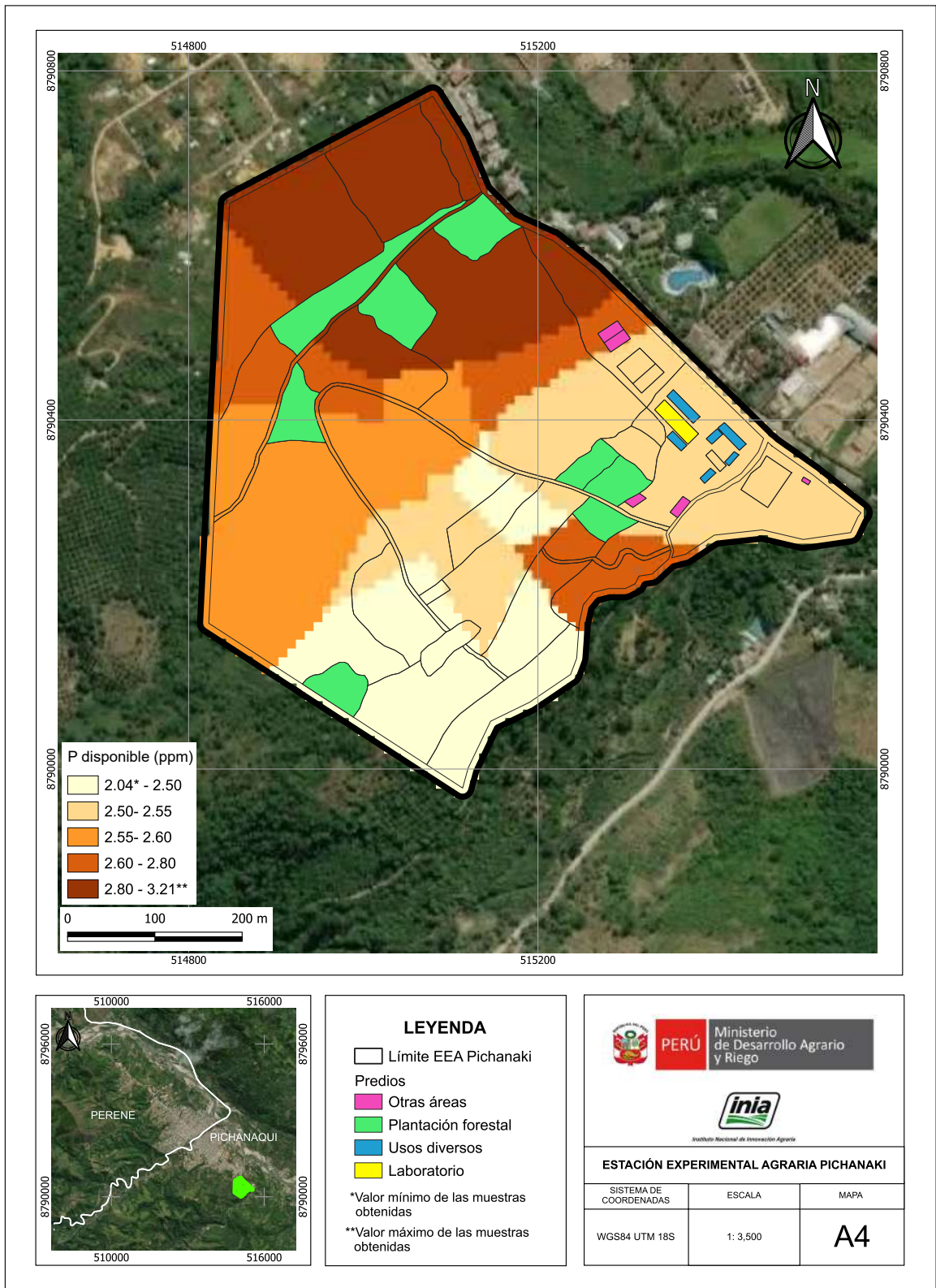


Figura 16. Mapa de variación espacial del fósforo (P) disponible

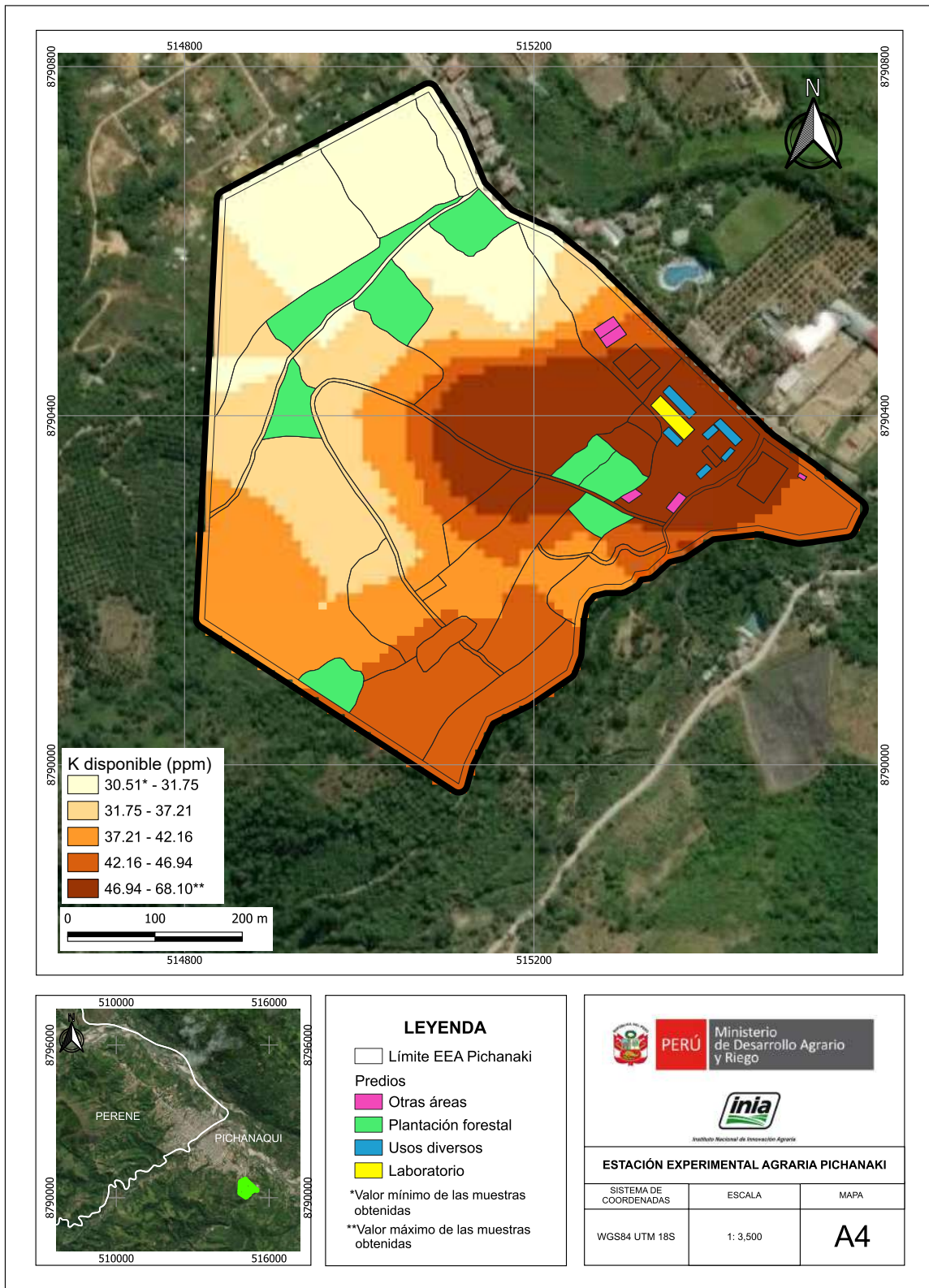


Figura 17. Mapa de variación espacial del potasio (K⁺) disponible

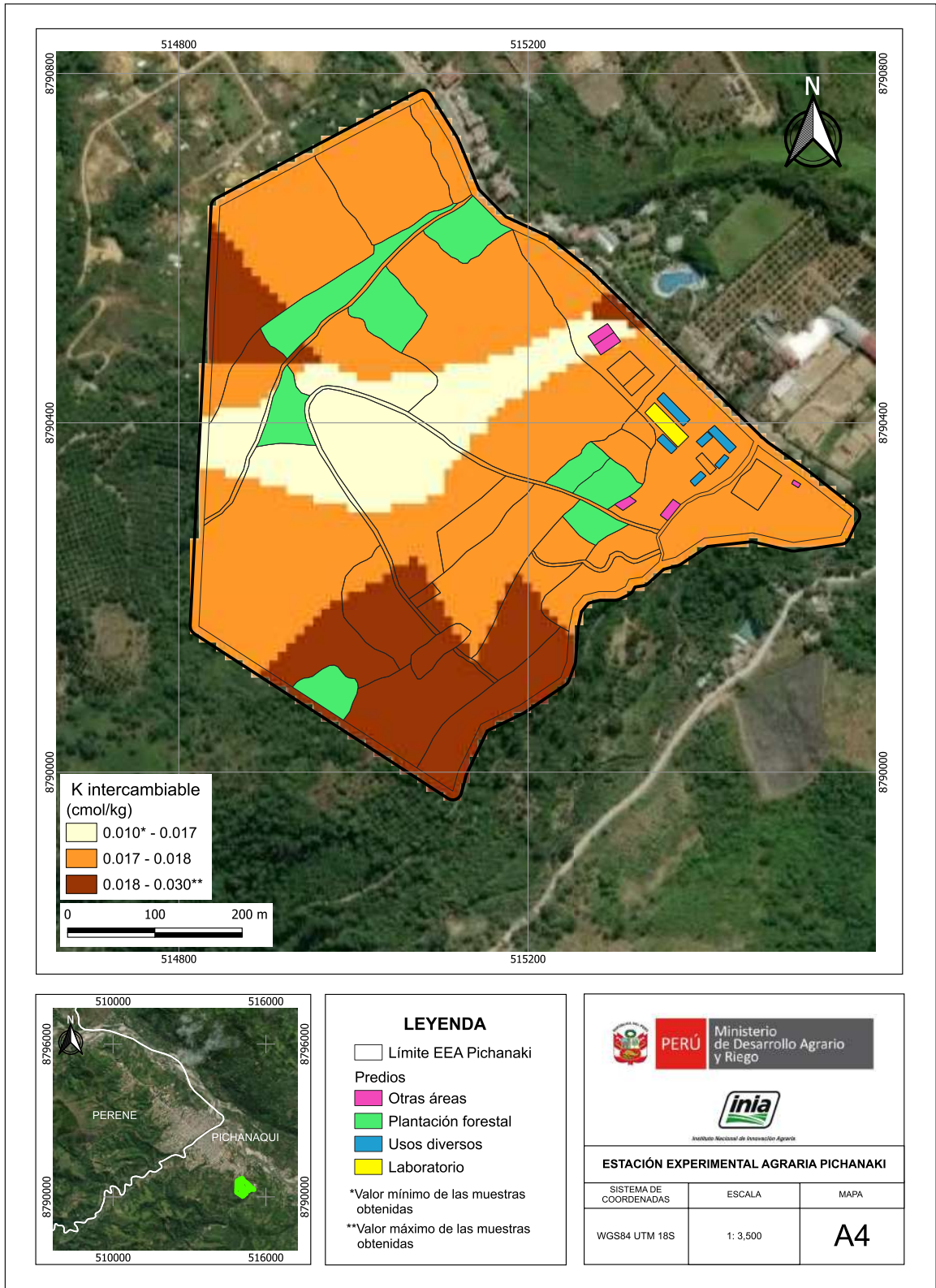


Figura 18. Mapa de variación espacial de potasio (K⁺) intercambiable

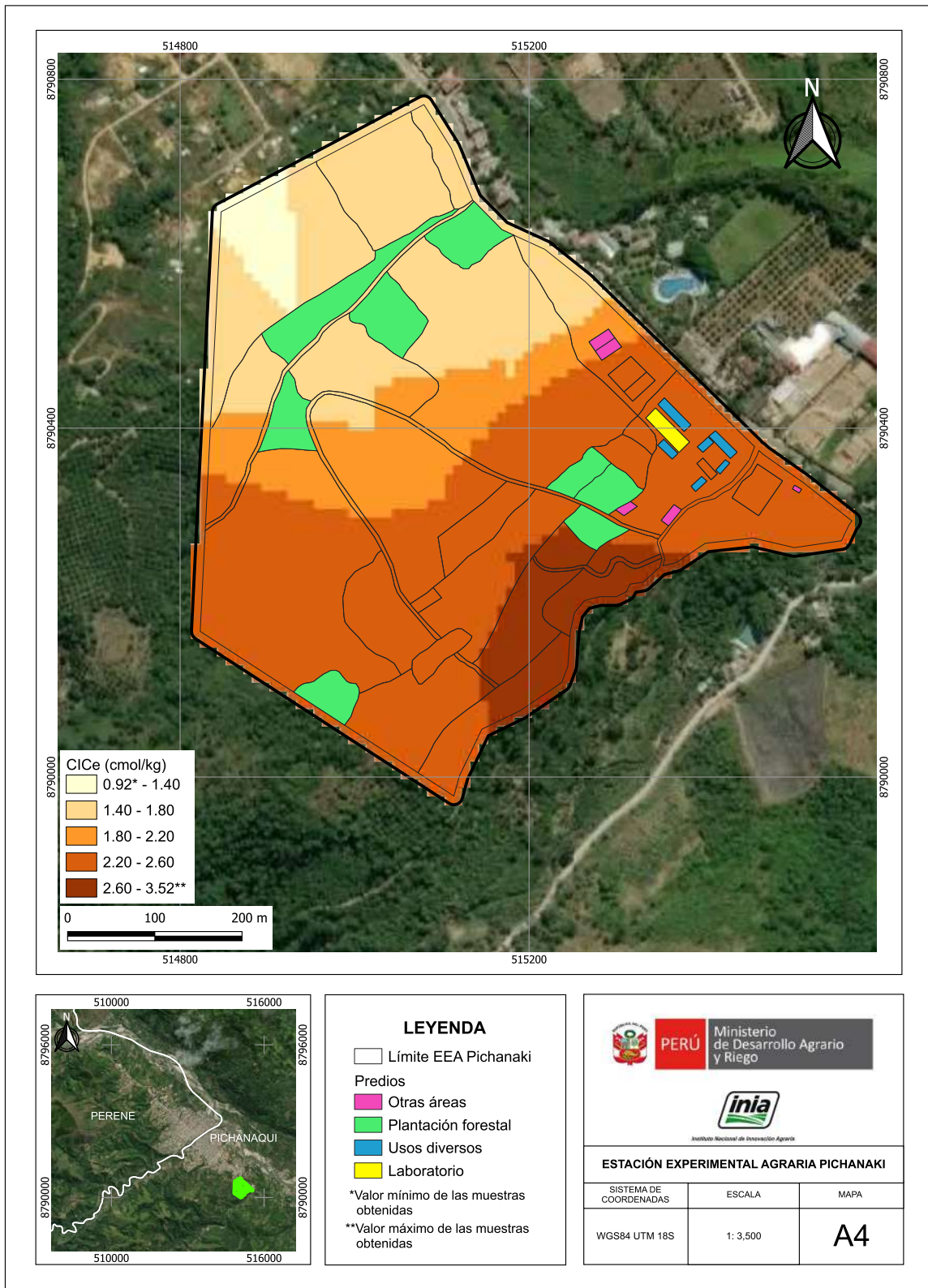


Figura 19. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)

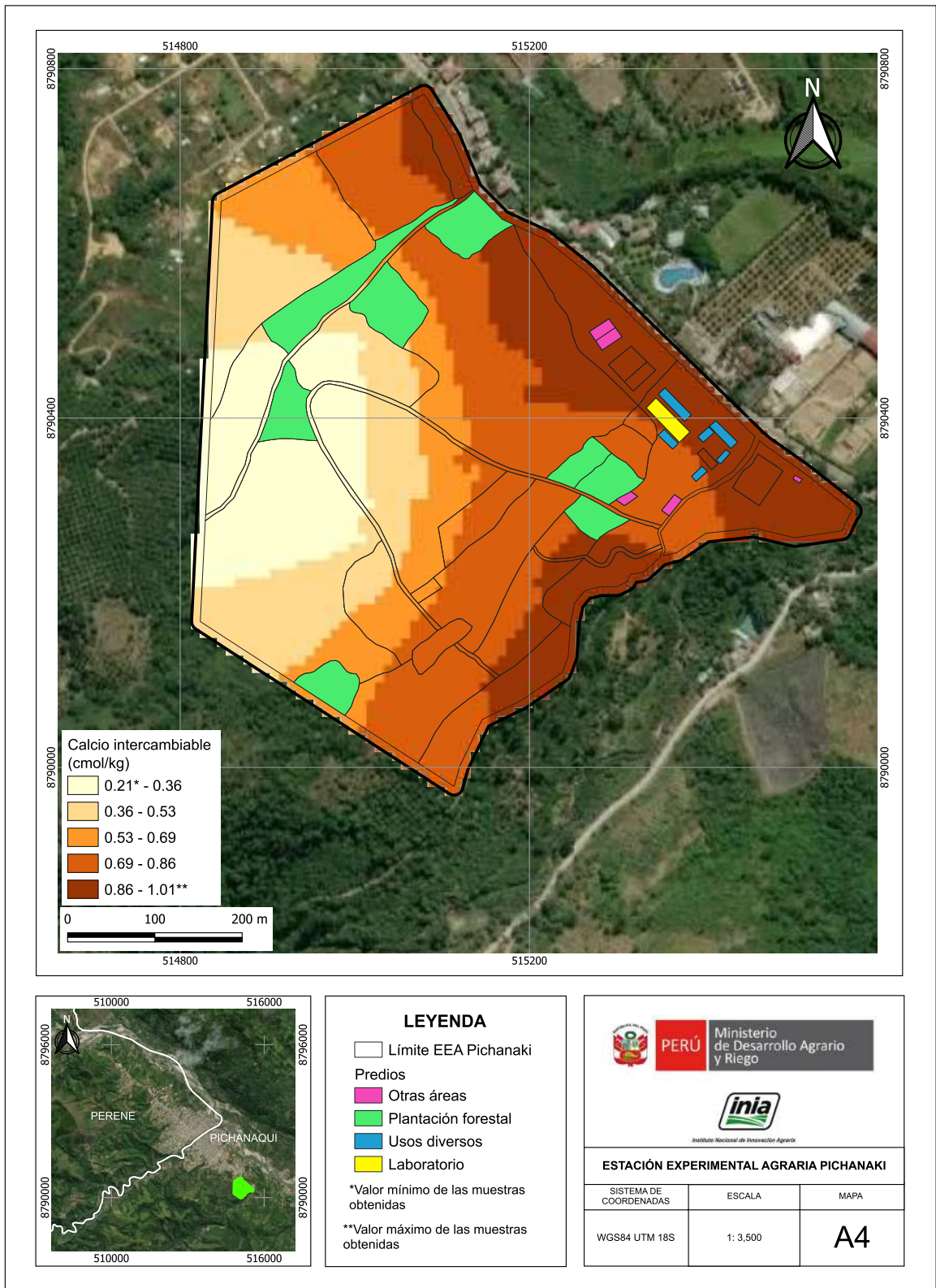


Figura 20. Mapa de variación espacial del calcio (Ca²⁺) intercambiable

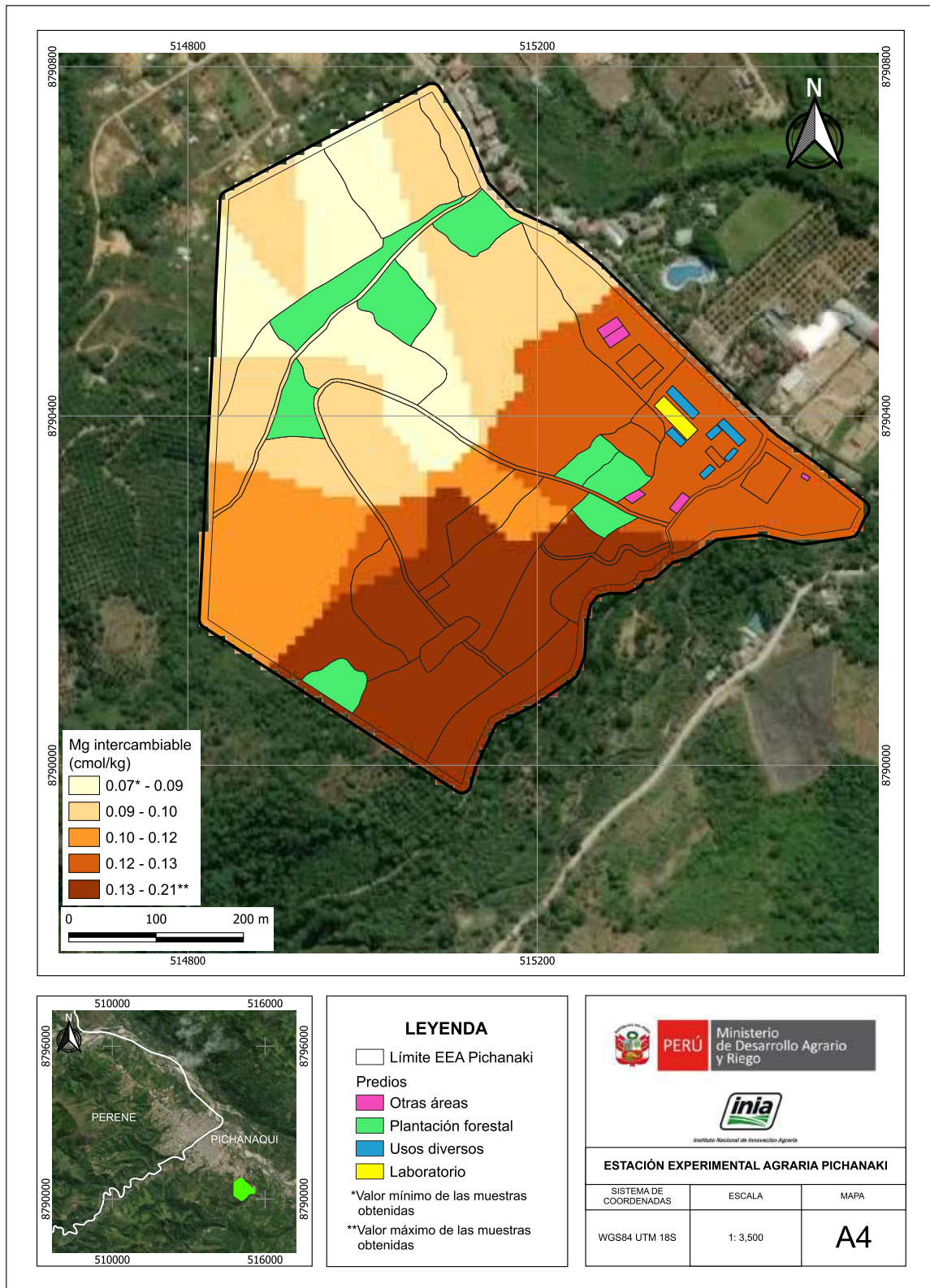


Figura 21. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg²⁺) intercambiable

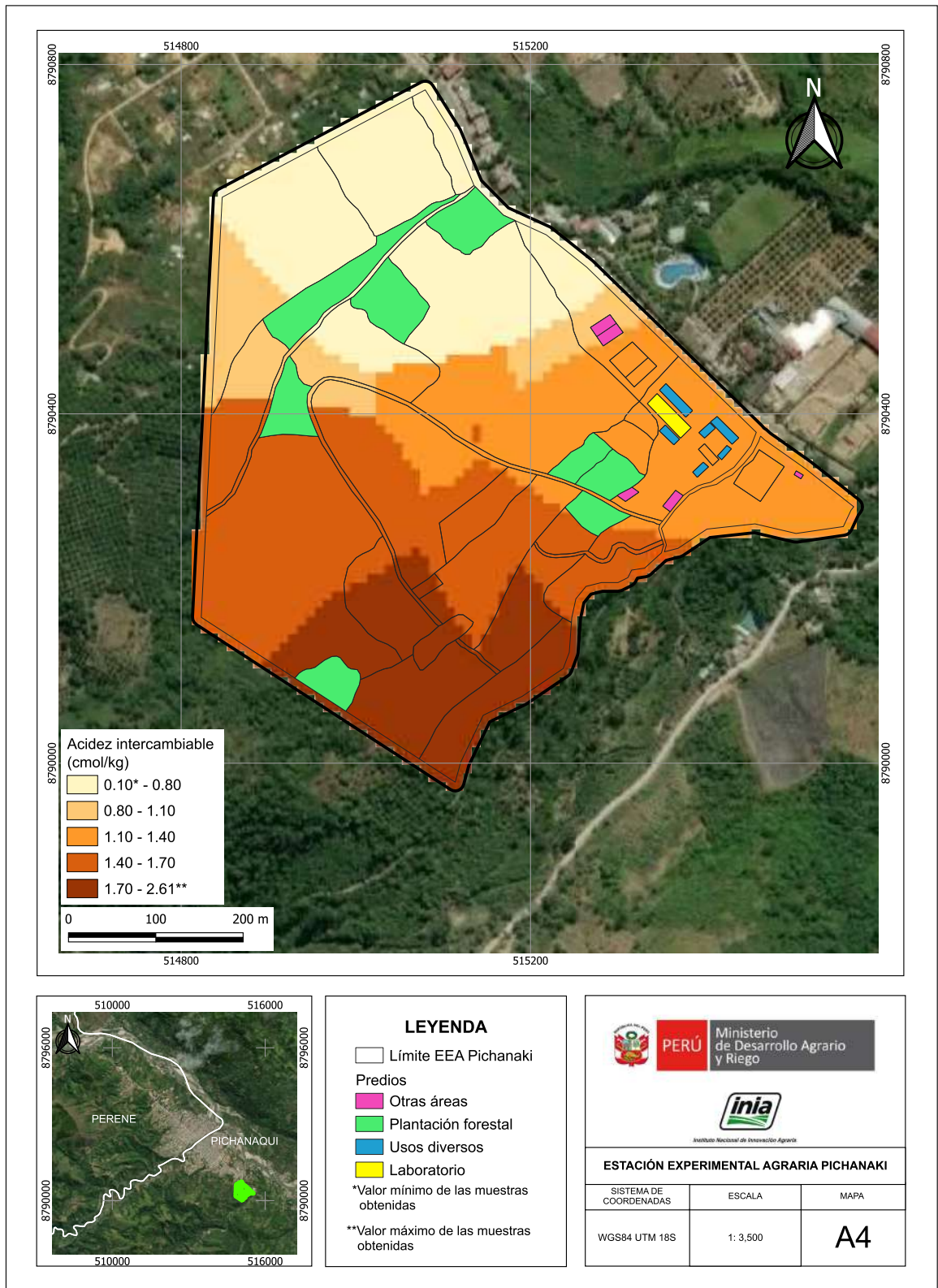


Figura 22. Mapa de variación espacial de la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$)

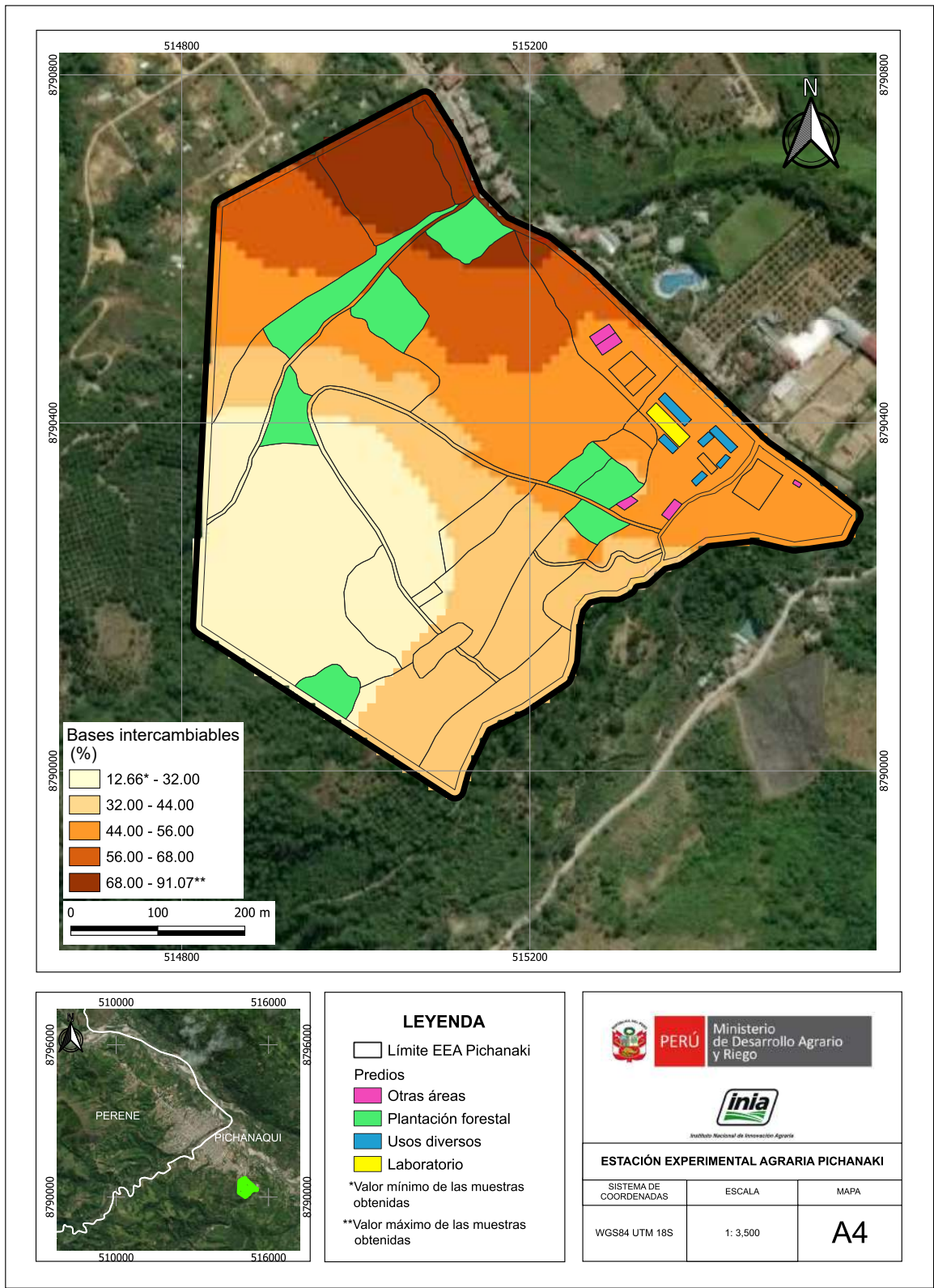


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de bases intercambiables (PBI)

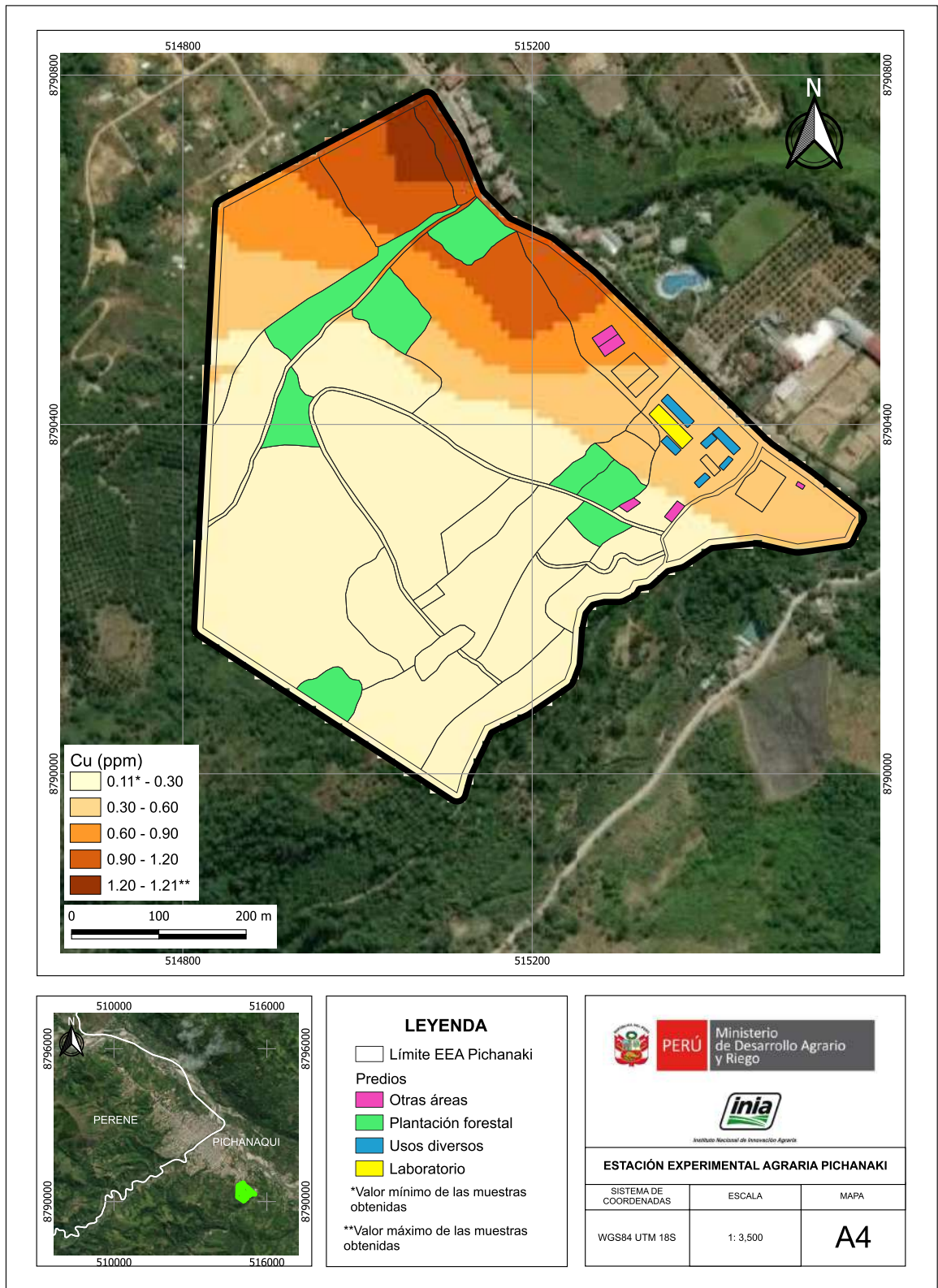


Figura 24. Mapa de variación espacial de cobre (Cu)

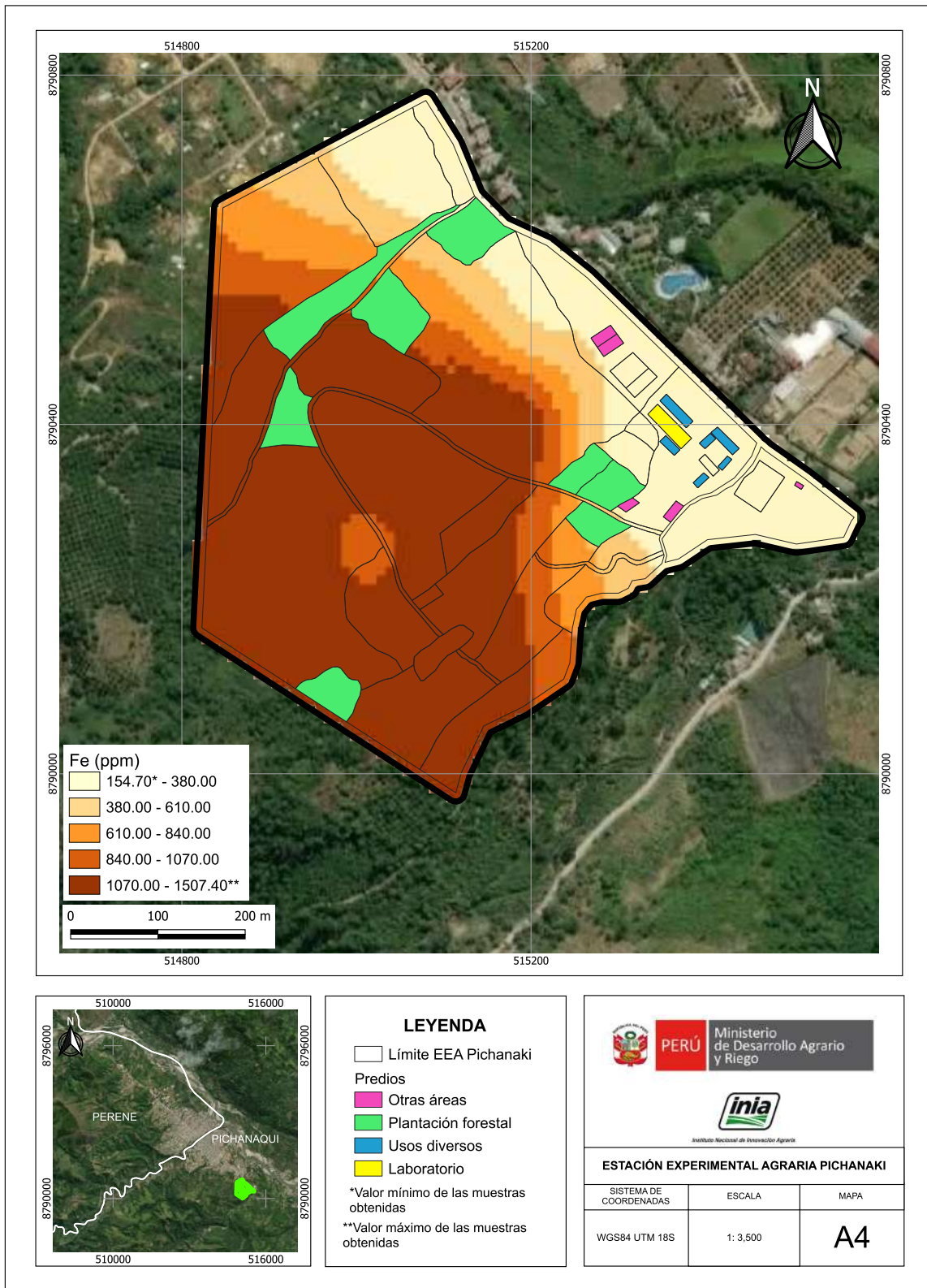


Figura 25. Mapa de variación espacial de hierro (Fe)

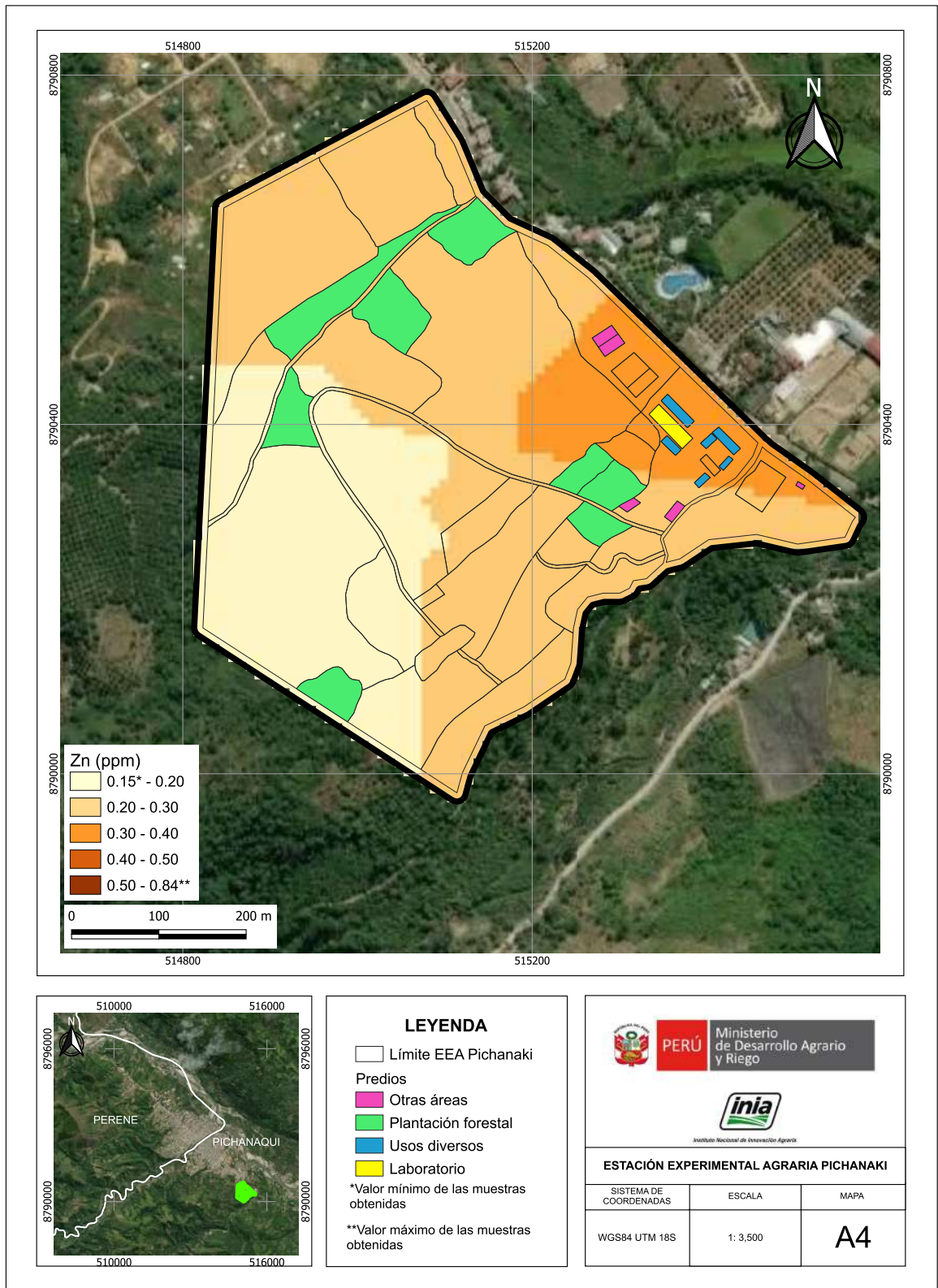


Figura 26. Mapa de variación espacial de zinc (Zn)

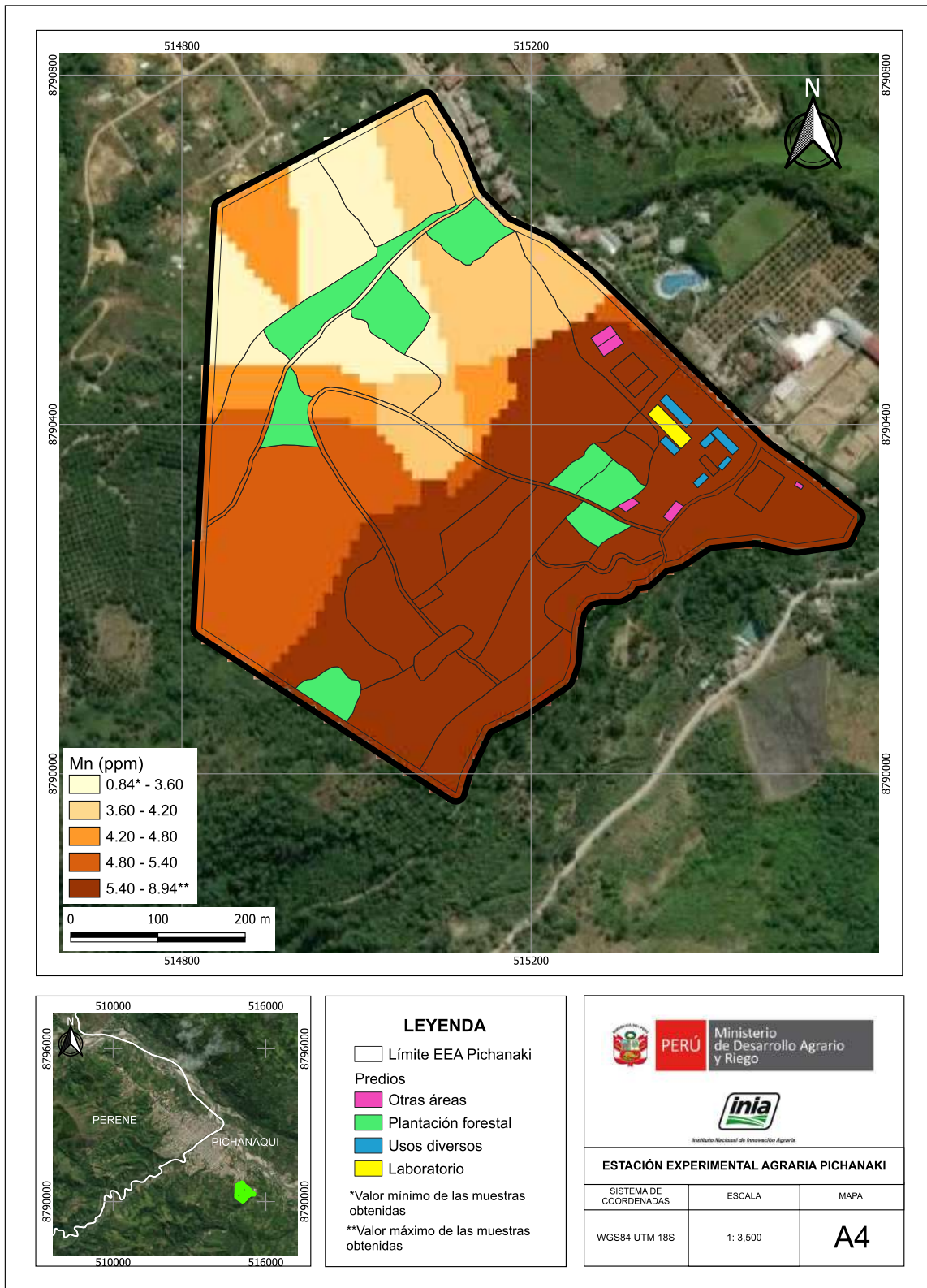


Figura 27. Mapa de variación espacial de manganeso (Mn)

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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Restricciones en la fertilidad por deficiencia de cationes básicos

El bajo índice de saturación de bases catiónicas constituye una de las principales limitaciones en la fertilidad química de los suelos evaluados. Como se indica en la Tabla 2, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) presentó valores bajos, con un promedio de 2.07 ± 0.86 cmol kg⁻¹, lo que indica una limitada capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes esenciales. Este comportamiento se asocia directamente con concentraciones reducidas de cationes básicos como el Ca²⁺ (0.68 ± 0.31 cmol kg⁻¹), Mg²⁺ (0.12 ± 0.05 cmol kg⁻¹) y K⁺ (0.02 ± 0.01 cmol kg⁻¹), que en conjunto explican la baja saturación de bases y la alta proporción de acidez intercambiable en el complejo de cambio.

4.1.2. Zonificación de la acidez intercambiable y estimación del requerimiento de cal

La acidez intercambiable representa una de las principales limitantes químicas en los suelos de la EEA Pichanaki. El contenido de Al³⁺ + H⁺ alcanzó un promedio de 1.25 ± 0.83 cmol kg⁻¹, indicando una alta saturación del complejo de cambio por cationes ácidos, situación que coincide con el pH fuertemente ácido observado (4.73 ± 0.44). El porcentaje de acidez intercambiable (PAI) se presenta como un indicador altamente viable para la delimitación de zonas de manejo, debido a su elevada estabilidad espacial y relevancia agronómica. Los resultados del análisis geoestadístico mostraron una predictibilidad espacial perfecta ($R^2 = 1.00$) (Tabla 3), lo que indica una estructura espacial completamente definida y sin ruido aleatorio en su distribución. Esta característica permite generar mapas de alta precisión para identificar áreas críticas con mayores niveles de acidez intercambiable, que requieren intervenciones específicas, como el encalado. Además, el PAI fue una de las variables con mayor contribución en la varianza de los datos, según el análisis de componentes principales (Figura 28), lo cual refuerza su importancia como descriptor clave de la fertilidad de los suelos. Su uso como criterio para zonificación puede facilitar la implementación de prácticas de manejo diferenciadas y eficientes, orientadas a la restauración de la fertilidad y la sostenibilidad productiva en sistemas afectados por la acidificación.

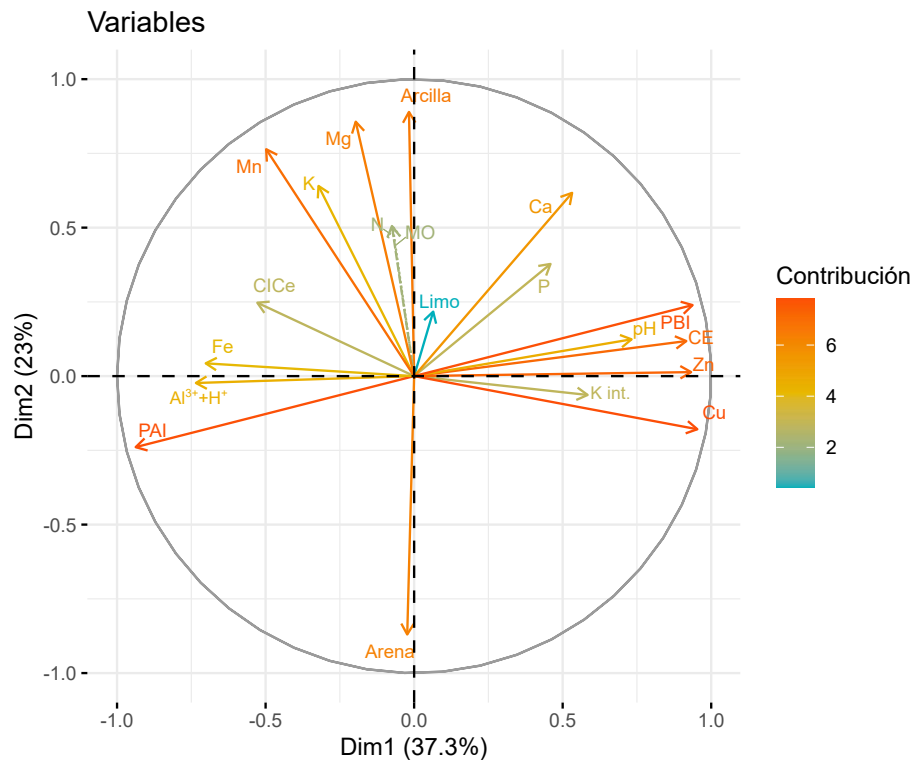


Figura 28. Análisis de componentes principales de las propiedades del suelo
 Al_H: contenido de Al³⁺ + H⁺, Contrib.: carga de cada variable, PAI: porcentaje de acidez intercambiable, PBI: porcentaje de bases intercambiables.

La interpolación mediante *kriging* ordinario permitió delimitar cinco zonas con diferentes niveles de PAI (Figura 29), destacando una zona crítica con valores por encima de 68 %, acompañados de una CIC efectiva entre 0.92 y 3.4 cmol kg⁻¹. Esta zona se considera altamente degradada por la intensidad de la acidez potencial y su limitada capacidad de intercambio.

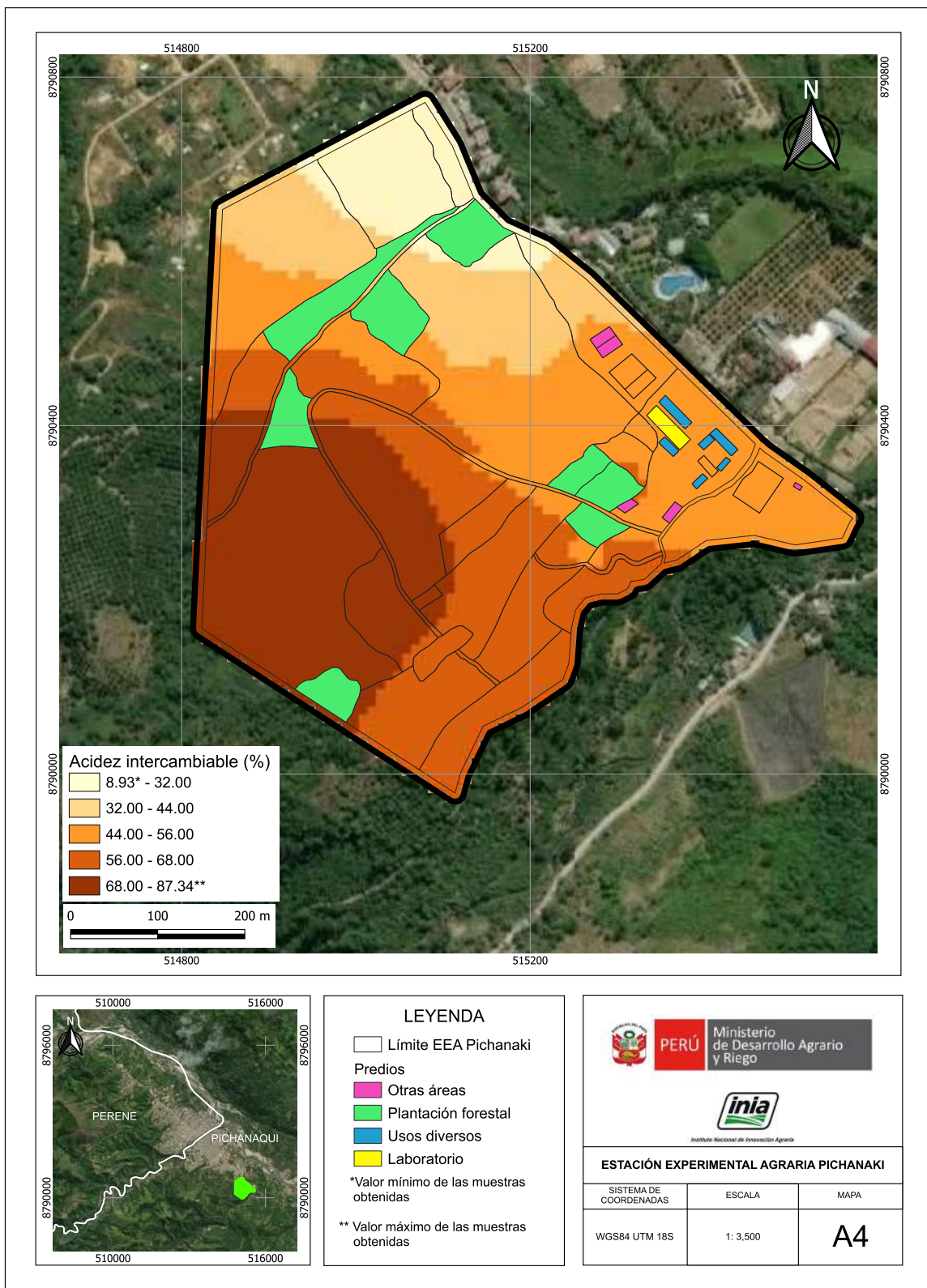


Figura 29. Mapa de variación espacial del porcentaje de acidez intercambiable (PAI)

Estos resultados nos brindan 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+} (fórmulas 12, 13 y 14).

Además, la capacidad buffer (B) del suelo se estima utilizando el porcentaje de arcilla y la siguiente 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 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ es mayor a 3.5 cmol kg^{-1} , se aplica:

$$\text{RC} = B [0.25 \times \text{CIC}] \quad \dots(13)$$

En cambio, si el PAT es mayor a 25 % y el $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ es menor a 3.5 cmol kg^{-1} , se aplica:

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

Donde:

RC: requerimiento de cal en toneladas por hectárea

B: capacidad buffer del suelo

PAT: porcentaje de acidez intercambiable tolerable

CIC: capacidad de intercambio catiónica efectiva

Arcilla: porcentaje de arcilla

Mediante este procedimiento, se estimó que el requerimiento de encalado para las zonas más degradadas de la EEA está comprendido entre 3.12 y 4.47 toneladas de cal por hectárea. De esta manera, la aplicación de cal 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, el encalado 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, el análisis espacial de la acidez 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, por lo que se recomienda complementar la dosis anual de cal mezclado con 3 t de biochar de residuos municipales ha^{-1} (Bolan et al., 2023; Condori-Ataupillco et al., 2025).

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

En el cultivo de cacao, el fósforo es fundamental para la ramificación de raíces, la floración y el cuajado de mazorcas (Carmona-Rojas, 2022). En la EEA Pichanaki, el P disponible presentó una media de 2.69 mg kg^{-1} y un coeficiente de variación (CV) de 15.03 %, lo que indica una alta heterogeneidad espacial, por debajo de 3.21 mg kg^{-1} en gran parte del territorio analizado (Figura 16). Sin embargo, los indicadores geoestadísticos del P disponible del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 0.17 y $R^2 = 0.38$). De esta manera, el requerimiento de fertilización fosforada sólo es posible realizarlo mediante un análisis de suelo sitio-específico.

En general, se considera que las concentraciones inferiores a 12 mg de fósforo por kg de suelo se asocian a deficiencias críticas que limitan la elongación de pelos radicales y reducen la eficiencia fotosintética. Por el contrario, valores entre 15 y 20 mg kg^{-1} son adecuados para cubrir las exigencias del cacao sin riesgo de fijación notable (van Vliet et al., 2015). Por ende, los resultados del análisis de suelos de la presente EEA revelaron deficiencias severas de la disponibilidad del P para el cultivo de cacao.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de cacao, se considerará la mediana del P-Bray (2.69 mg kg^{-1}). De esta manera, se estimará el requerimiento de fertilización de mantenimiento y construcción para el cultivo de cacao, considerando los datos presentados a continuación. 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 2.69 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 20 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 2.69 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 se considera que este incremento es el 20 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.2 \times 0.4 \text{ t ha}^{-1} = 0.08 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.08 \text{ t ha}^{-1} + 0.6 \text{ t ha}^{-1} = 0.68 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0.68 \text{ t ha}^{-1} = 2.72 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{2.72 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 13.60 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 12 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, lo cual se denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{12 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 18 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 13.6 \text{ kg de P ha}^{-1} + 18 \text{ kg de P ha}^{-1} = 31.6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 31.60 kg de P ha⁻¹. Posteriormente, se calcula el equivalente de este valor en fertilizante, el cual resulta 139.16 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (52 % de P₂O₅).

Con esta dosis anual de fertilizante, se logra restaurar el P disponible hasta niveles óptimos para el cultivo de cacao y asegurar una reserva de fósforo en el suelo que sustenta rendimientos sostenidos a largo plazo. Este enfoque, basado en mapas de P disponible y modelos estadísticos, permite una fertilización precisa y eficiente, reduciendo costos y riesgos ambientales asociados al uso indiscriminado de fertilizantes.

4.3. Aplicación de bioinsumos

Además de las recomendaciones convencionales de fertilización fosfatada en cacao, existen otras prácticas sostenibles que mejoran la disponibilidad y aprovechamiento del fósforo en el suelo, con la finalidad de reducir la dependencia de fertilizantes y favorecer la salud del suelo del sistema cacaotero. La inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) favorece la absorción de P y otros nutrientes a través de la extensión del sistema de raíces por hifas micorrícicas. Además, esta tecnología mejora el establecimiento y crecimiento de plantas jóvenes de cacao en suelos con limitaciones de P (Cozzolino et al., 2013; Kadanga et al., 2024; Nurhalisyah et al., 2020). Ensayos en vivero y en campo con cacao han mostrado incrementos en biomasa y vigor de plántulas tras la inoculación con HMA, lo que sugiere que estas asociaciones pueden permitir reducir las dosis de fertilizantes fosfatados sin comprometer el rendimiento (Kadanga et al., 2024; Nurhalisyah et al., 2020).

La aplicación de *Trichoderma*, tanto como inoculante de semilla y plántula como en formulaciones para suelo, aporta beneficios múltiples al cacao como la solubilización de formas inorgánicas y orgánicas de P, estimulación del crecimiento radicular y efectos de biocontrol sobre patógenos del suelo. Estudios en cacao y en cultivos hortícolas han documentado mejoras en germinación, vigor y características agronómicas tras el uso de *Trichoderma* (Chávez-Jalk et al., 2022; de Sousa et al., 2021).

Así mismo, los cultivos de cobertura (por ejemplo, las leguminosas) son otra herramienta práctica para mejorar la nutrición fosforada en cacaotales. A través de la acumulación de materia orgánica, la movilización microbiana del P y la alteración favorable de las fracciones de fósforo del suelo, los cultivos de cobertura pueden incrementar el P disponible y la capacidad del sistema para acceder a reservas de P (Hall et al., 2010; Hallama et al., 2019). En agroforestería cacaotera, la combinación de coberturas, manejo de residuos vegetales y rotación o sucesión con especies que favorezcan la actividad microbiana ha mostrado efectos positivos sobre las fracciones de P y la retención de nutrientes en el perfil del suelo (Hall et al., 2010).

Finalmente, las enmiendas orgánicas y biofertilizantes locales pueden reforzar la estructura del suelo y la microbiota benéfica, al incrementar la eficiencia de uso del fósforo en cacao. Los trabajos recientes en sistemas cacaoteros muestran que la combinación de enmiendas orgánicas con inoculantes microbianos pueden mejorar la salud del suelo, la disponibilidad de P y la productividad sin aumentar proporcionalmente la aplicación de fertilizantes fosfatados comerciales (Schmidt et al., 2025; Snoeck et al., 2016).

En síntesis, la evidencia sugiere que un enfoque integrado (fertilización mineral, inoculación con HMA, uso de *Trichoderma* y otras bacterias solubilizadoras, establecimiento de cultivos de cobertura y adición de enmiendas orgánicas) constituye una estrategia robusta para optimizar la nutrición fosforada del cacao de manera sostenible. Se recomienda validar estas prácticas mediante ensayos locales (vivero y parcela) para ajustar cepas microbianas, dosis y manejo en función de las condiciones edafoclimáticas y del estado inicial de P del suelo.



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 and crop stress*, (pp. 51-60). Marcel Dekker Inc.
- 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://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/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.
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., van Zwieten, L., Sooriyakumar, P., Ahmed-Khan, B., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., Riklebe, J., Wang, H., Pal-Singh, B., y Siddique, K. H. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution*, 317. 10.1016/j.envpol.2022.120632
- 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://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c6>
- Carmona-Rojas, L. M. (2022). Nutrition in cacao (*Theobroma cacao* L.) crops: What determining factors should be considered? *Rev. Fac. Agron*, 121(2). <https://doi.org/10.24215/16699513e101>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chavez-Jalk, A., Leiva, S., Bobadilla, L. G., Vigo, C. N., Arce, M., y Oliva-Cruz, M. (2022). Effect of endophytic *Trichoderma* sp. strains on the agronomic characteristics of ecotypes of *Theobroma cacao* L. under nursery conditions in Peru. *International Journal of Agronomy*, 1. <https://doi.org/10.1155/2022/5297706>
- 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>
- 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>
- 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>
- Cozzolino, V., Di Meo, V., y Piccolo, A. (2013). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.006>
- 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. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- 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/ajj2.20787>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- 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>
- 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*. 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>
- Hall, H., Li, Y., Comerford, N. B., Arévalo Gardini, E., Zúñiga Cernades, L., Baligar, V., y Popenoe, H. (2010). Cover crops alter phosphorus soil fractions and organic matter accumulation in a Peruvian cacao agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 80, 447-455. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9333-8>
- Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., y Kandeler, E. (2019). Hidden miners - The roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*, 434(1), 7-45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Heuvelink, G. B. M., y Webster, R. (2022). Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure. *Spatial Statistics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100639>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality — Determination of specific electrical conductivity*.
- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method*.
- Kadanga, P., Tchabi, A., Adigninou Abledé, K., Blaise M'Boumba, Komivi Exonam A., y Kondow, M. (2024). The potential evaluation of mycorrhizal inoculation on the growth of young cocoa plants (*Theobroma cacao* L.) hybrid P7 × IMC67 in greenhouse. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 13(2), 129–139. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2024.1302.018>
- 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>
- Lowenberg-DeBoer, J., y Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4), 1552-1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiúdoles 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>
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., y Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

- 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. y D. A. Whitney, *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-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>
- Nurhalisyah, N., Pongpisutta, R., Rattanakreetakul, C., y Kaewgrajang, T. (2020). Role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings growth. *Khon Kaen Agricultural Journal*, 48(4), 923-932. <https://doi.org/10.14456/kaj.2020.84>
- 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/>
- 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>
- Puertas, F., Arévalo, E., Zúñiga, L., Alegre, J., Loli, O., Soplín, H., y Baligar, V. (2008). Establecimiento de cultivos de cobertura y extracción total de nutrientes en un suelo de trópico húmedo en la Amazonía. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 23-28. <https://doi.org/10.21704/REA.V7I1-2.356>
- Quispe, K., Hermoza, N., Mejía, S., Romero-Chavez, L. E., Ottos, E., Arce, A., y Solórzano-Acosta, R. (2025). Spatial Analysis of Soil Acidity and Available Phosphorus in Coffee-Growing Areas of Pichanaqui: Implications for Liming and Site-Specific Fertilization. *Agriculture*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/agriculture15151632>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rojas-Briceño, N. B., Barboza-Castillo, E., Maicelo-Quintana, J. L., Oliva-Cruz, S. M., y Salas López, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: Índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2538a>
- 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>

- Schmidt, J. E., Flores, J., Barragán, L., Amores, F., Jr., y Khalsa, S. D. S. (2025). Optimizing cocoa productivity through soil health and microbiome enhancement: Insights from organic amendments and a locally derived biofertilizer. *Microorganisms*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/microorganisms13061408>
- Sitthaphanit, C., Limpinuntana, V., Toomsan, B., Panchaban, S., y Bell, R. W. (2009). Fertiliser strategies for improved nutrient use efficiency on sandy soils in high rainfall regimes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84(1), 45-55. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9253-z>
- Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., y Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. En E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (vol. 19, pp. 155–202). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4
- Solórzano, R., Cruz, J., Chuchon, R. J., Romero-Chavez, L. E., Lozano, A., y Gaona-Jimenez, N. (2025). The conversion of forests to agricultural croplands significantly depletes soil organic carbon reserves, total nitrogen, and available potassium, reaching critical thresholds in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Soil Science*, 5.
- de Sousa, W. N., Brito, N. F., Felsemburgh, C. A., Vieira, T. A., y Lustosa, D. C. (2021). Evaluation of *Trichoderma* spp. isolates in cocoa seed treatment and seedling production. *Plants*, 10(9), 1964. <https://doi.org/10.3390/plants10091964>
- 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. <https://www.rbcjournal.org/article/evaluation-of-traditional-methods-for-estimating-lime-requirement-in-brazilian-soils/>
- 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>
- van Vliet, J. A., Slingerland, M., y Giller, K. E. (2015). *Mineral nutrition of cocoa: A review*. Plant Production Systems Group, Wageningen University & Research. <https://edepot.wur.nl/356090>
- 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., 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), 629. <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* [Tesis para Magister Scientiae, University of Hawaii at Manoa]. ScholarSpace. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

Red de 16 Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliareos al servicio de la agricultura peruana



- 1 EEA Vista Florida - Lambayeque
- 2 EEA Baños del Inca - Cajamarca
- 3 EEA Donoso - Lima Provincia
- 4 CE La Molina - Lima
- 5 EEA Santa Ana - Junín
- 6 EEA Canaán - Ayacucho
- 7 EEA Arequipa - Arequipa
- 8 EEA Illpa - Puno
- 9 EEA El Porvenir - San Martín
- 10 EEA Pucallpa - Ucayali
- 11 EEA Pichanaki - Junín
- 12 EEA Perla del VRAEM - Cusco
- 13 EEA Moquegua - Moquegua
- 14 CE Yanayacu - Cajamarca
- 15 EEA El Chira - Piura
- 16 EEA Chíncha - Ica

Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios





Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-247-6



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru