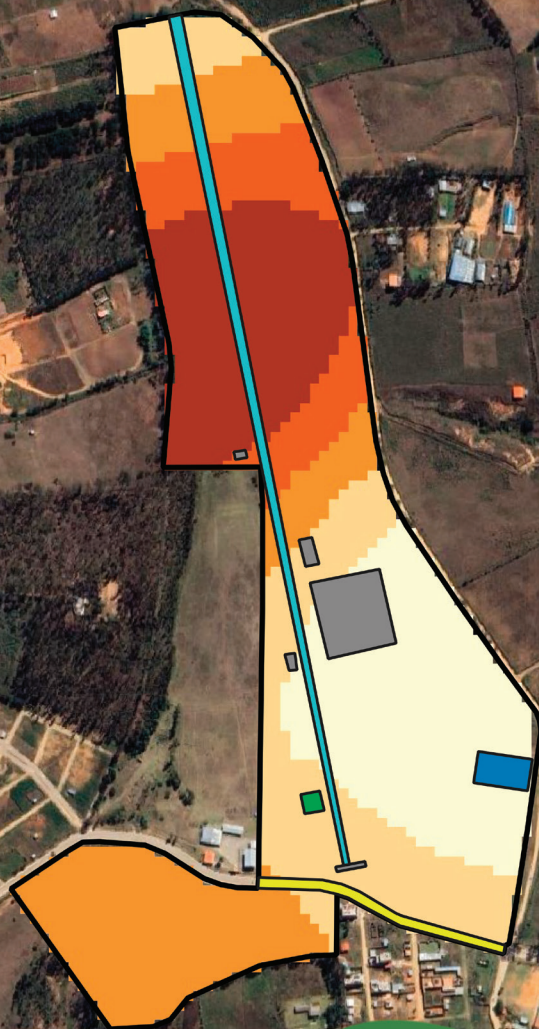


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Amazonas



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 Amazonas



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA AMAZONAS

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Felipe César Meza Millán

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Jorge Luis Sáenz Rabanal

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:

Julio, 2026

Publicado:

Julio, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-271-1

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° 2026-08266

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Carlos Mattos-Mendoza, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Antony Chavez-Jalk, Dangiela S. Alva-Vasquez, Luis A. Montenegro-Acuña, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** 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 Amazonas	25
3.1. Ubicación	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>	33
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades fisicoquímicas del suelo	35
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Amazonas	59
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	59
4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de Mg^{2+}	59
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	60
4.2.1. Cálculos de requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cacao	60
4.2.2. Cálculos de requerimiento de fertilización potásica de mantenimiento y construcción para el cacao	62
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 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 Código Único de Inversiones N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

Conocer cómo varía la fertilidad del suelo dentro de un terreno es importante para mejorar la producción agrícola y usar de manera adecuada los fertilizantes. Para ello, se emplean herramientas de análisis y mapas que permiten identificar las zonas del campo con diferentes niveles de nutrientes en el suelo. Esta información ayuda a tomar mejores decisiones sobre el manejo del cultivo, aprovechar mejor los insumos agrícolas y promover una producción más eficiente y sostenible.

En el presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Amazonas”, se presentan los resultados del análisis realizado para conocer cómo varían las propiedades del suelo en las diferentes zonas del área evaluada. Asimismo, se explica la metodología utilizada y se brinda información útil para orientar el manejo de la fertilización y mejorar el uso del suelo, contribuyendo así a una mejor producción agrícola.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La degradación del suelo en regiones tropicales constituye una amenaza crítica para la sostenibilidad de la producción agrícola y la provisión de servicios ecosistémicos, debido a su estrecha relación con la pérdida de carbono orgánico, la erosión y la disminución de la productividad. En particular, el cambio de uso del suelo y la intensificación agrícola aceleran los procesos de degradación física y química, afectando el almacenamiento de carbono y la disponibilidad de nutrientes, especialmente en ecosistemas tropicales (Don et al., 2010). En la Amazonía peruana, la deforestación contribuye a la degradación del suelo, ya que las áreas intervenidas suelen destinarse al establecimiento de pastizales que, en muchos casos, se manejan de forma inadecuada, con prácticas como la sobrecarga animal y el sobrepastoreo. Aproximadamente el 70 % de los bosques deforestados han sido convertidos en pastizales para actividades ganaderas (Alegre et al., 2019).

La región Amazonas, una de las principales zonas productoras de arroz, café, cacao y frijol, presenta condiciones edafoclimáticas que favorecen una alta heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo. La interacción entre precipitaciones intensas, relieve complejo y variabilidad de materiales parentales genera una distribución irregular de nutrientes y del carbono orgánico, lo que condiciona la respuesta de los cultivos y la eficiencia en el manejo de la fertilidad (Ruiz et al., 2026). Cuando esta heterogeneidad no es adecuadamente caracterizada ni gestionada, puede dar lugar a la sobrefertilización en algunos sectores y a deficiencias nutricionales en otros, con implicancias económicas y ambientales, como pérdidas de nutrientes por lixiviación y una baja eficiencia en el uso de fertilizantes (Bhagwan et al., 2025).

Con el fin de no agravar la problemática de degradación del suelo en la región Amazonas, es fundamental conocer la variabilidad de sus propiedades fisicoquímicas; para ello, es necesario emplear herramientas que permitan su adecuado diagnóstico y monitoreo. Las tecnologías como los sistemas de posicionamiento global (GPS), la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) permiten recopilar datos edáficos de manera eficiente y, en muchos casos, en tiempo casi real, lo que facilita la elaboración de mapas de alta resolución sobre la variabilidad de las propiedades del suelo. Estas herramientas han transformado significativamente el monitoreo y la gestión de áreas agronómicas, al posibilitar la delimitación de zonas de manejo homogéneo. En este contexto, métodos de interpolación como el *kriging*, integrados con SIG, han demostrado ser eficaces para identificar “*hotspots*” de degradación, orientar la fertilización diferenciada y apoyar la implementación de estrategias de restauración ecológica en zonas críticas (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este contexto, el presente documento técnico tiene como objetivo evaluar la variación espacial de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria Amazonas mediante el análisis e interpretación de sus propiedades fisicoquímicas y el uso de herramientas de análisis espacial. A partir de la generación de mapas temáticos de fertilidad, se busca identificar zonas con características similares que faciliten la toma de decisiones para un manejo más eficiente de la fertilización y del suelo. Asimismo, se presenta una metodología basada en la modelación de semivariogramas y la interpolación por *kriging*, la cual puede ser aplicada en otros sistemas agrícolas para contribuir al uso adecuado de los insumos, mejorar la productividad y promover la sostenibilidad del recurso 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 (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).

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de BCSR surgió a partir de los trabajos de William Albrecht durante los años treinta, quien exploró cómo la proporción de cationes básicos intercambiables dentro de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) incidía en el rendimiento de los cultivos (Culman et al., 2021). A partir de investigaciones llevadas a cabo en tierras agrícolas de Misuri, Albrecht planteó que una distribución equilibrada de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) favorece la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de las raíces (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis sostiene que cuando las proporciones catiónicas en la solución suelo se alejan de los valores óptimos, la absorción de nutrientes por parte de los cultivos se ve comprometida, ya que un desbalance entre los iones presentes interfiere con los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de dichos nutrientes. Estos mecanismos de regulación del equilibrio iónico se representan en la Figura 1. Cabe señalar que solo una fracción reducida de los nutrientes que necesitan las plantas se halla en la solución suelo o en formas reactivas, y que cada uno de estos mecanismos actúa como un reservorio iónico (Quispe-Matos et al., 2025).

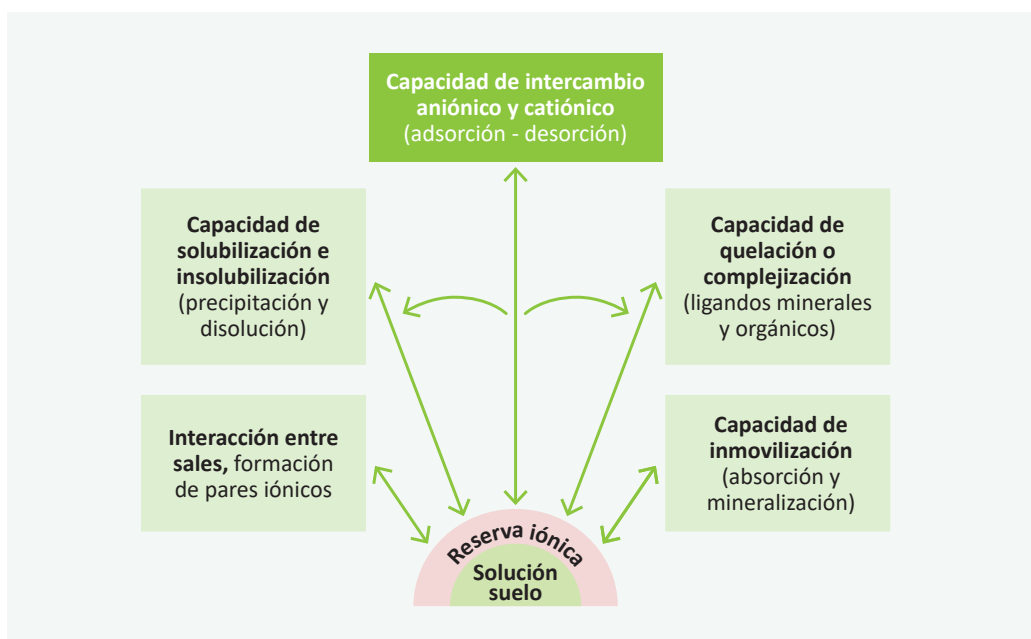


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Bear et al. (1945), a partir de estudios realizados en suelos agrícolas de Nueva Jersey, aportaron evidencia empírica que apoyó en parte la hipótesis de Albrecht. De acuerdo con sus investigaciones, y con los trabajos posteriores de 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^+ , en tanto que el hidrógeno (H^+) y el aluminio (Al^{3+}) deberían mantenerse por debajo del 15 % para prevenir efectos tóxicos en suelos ácidos. A raíz de estos hallazgos, el BCSR comenzó a emplearse como criterio orientador en la elaboración de programas de fertilización y corrección de suelos (Zhang, 1999).

En años más recientes, diversas investigaciones han evaluado comparativamente la eficacia del BCSR frente al sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), encontrando que, en numerosos casos, la disponibilidad absoluta de nutrientes predice mejor el rendimiento de los cultivos que la proporción relativa entre cationes (Brock et al., 2021). No obstante, en suelos con CIC elevada ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, alta lixiviación o desbalances extremos de bases, el BCSR continúa siendo una herramienta valiosa para el diagnóstico de la 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, dado 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). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2 (Espinosa y Molina, 1999).

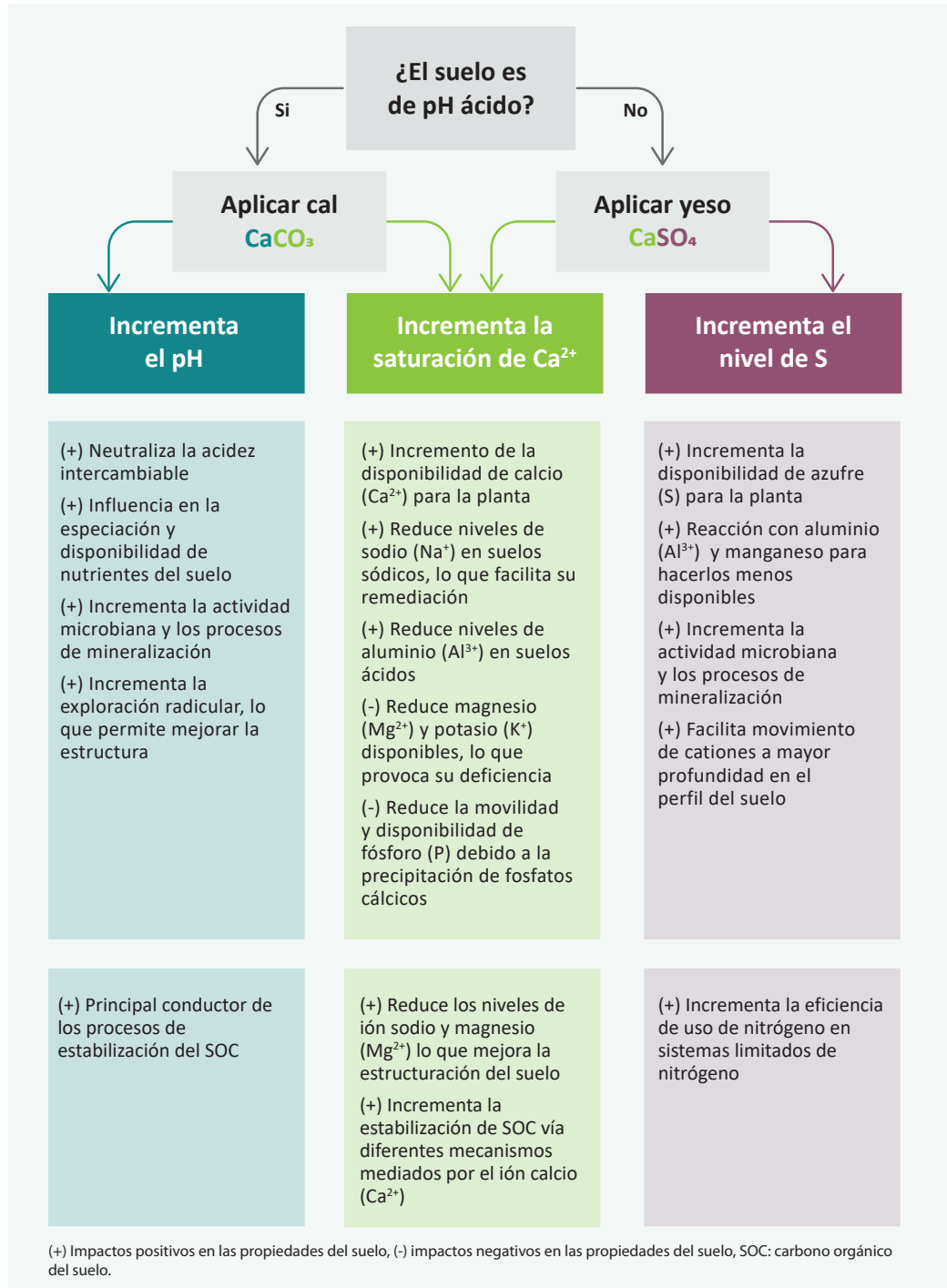


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El 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 (Quispe-Matos et al., 2025), que se describen en la Figura 3.

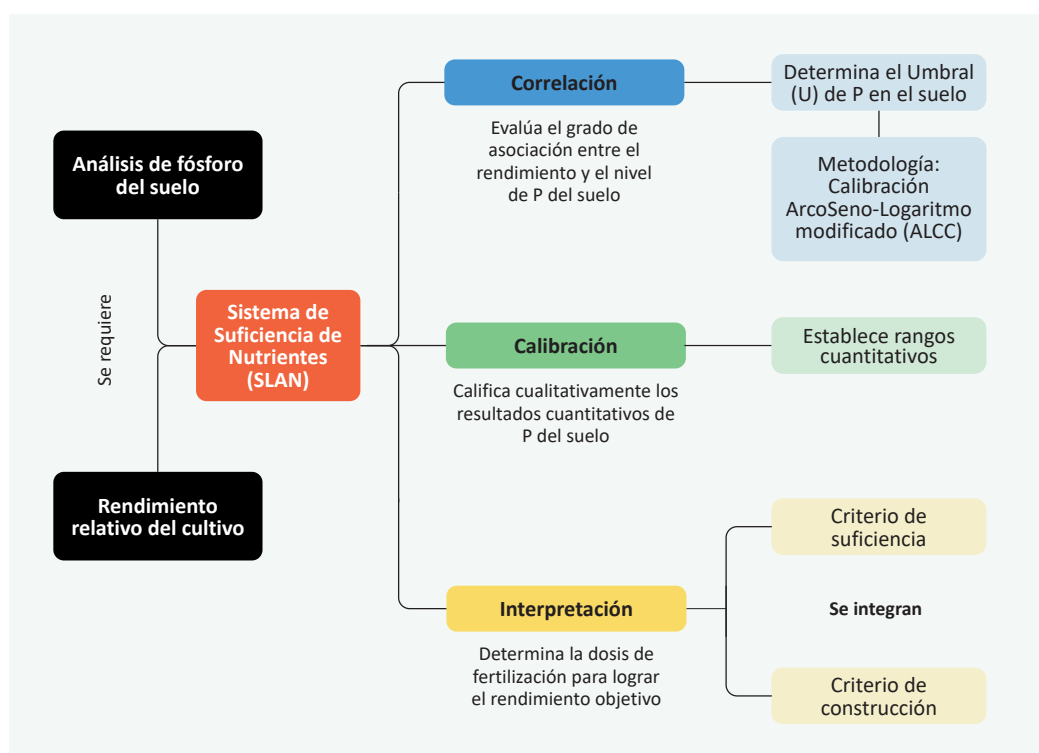


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN) para el P del suelo

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), dado que este define el objetivo agronómico y el enfoque de fertilización (Marino y Echeverría, 2018).

Además, para calcular los requerimientos 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, y 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.

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

A continuación, se presenta un ejemplo práctico, adaptado de Quispe-Matos et al. (2025), para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de cacao, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de cacao, y se obtuvo 20 mg de P por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 25 mg de P-Olsen 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 20 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 90 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 20 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando la Fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{90 \times 2}{100} = 1,8 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (20 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (25 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 90 % del potencial (1,8 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 se considera que este incremento es el 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,8 \text{ t ha}^{-1} = 0,63 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de producción, el cultivo genera $0,63 \text{ t ha}^{-1}$ 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,8 \text{ t ha}^{-1} + 0,63 \text{ t ha}^{-1} = 2,43 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4,7 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 4,7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2,43 \text{ t ha}^{-1} = 11,42 \text{ kg ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de $11,42 \text{ kg de P ha}^{-1}$ para alcanzar un rendimiento objetivo de $2,43 \text{ t ha}^{-1}$, el cual está conformado por $0,63 \text{ t ha}^{-1}$ de biomasa radicular y vegetativa, y $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de producción.

Aplicación de los criterios de construcción y mantenimiento

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, 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 (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, el uso de este criterio 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 en el cultivo de cacao para la aplicación del criterio de mantenimiento, así como de los criterios de mantenimiento y construcción (adaptado de Quispe-Matos et al., 2025).

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelo en un cultivo de cacao, y se obtuvo 15 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera un nivel medio.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 25 mg de P-Olsen 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-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 60 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 15 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

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

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 0,42 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1,2 \text{ t ha}^{-1} + 0,42 \text{ t ha}^{-1} = 1,62 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4,7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4,7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1,62 \text{ t ha}^{-1} = 6,32 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

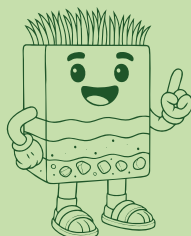
$$\text{RM de P} = \frac{6,32 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 21,06 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de cacao es 21,06 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de cacao, y se obtuvo 10 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 25 mg de P-Olsen 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-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



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 10 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 2}{100} = 0,6 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 0,6 \text{ t ha}^{-1} = 0,21 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,6 \text{ t ha}^{-1} + 0,21 \text{ t ha}^{-1} = 0,81 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4,7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4,7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0,81 \text{ t ha}^{-1} = 3,80 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{3,80 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 12,66 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

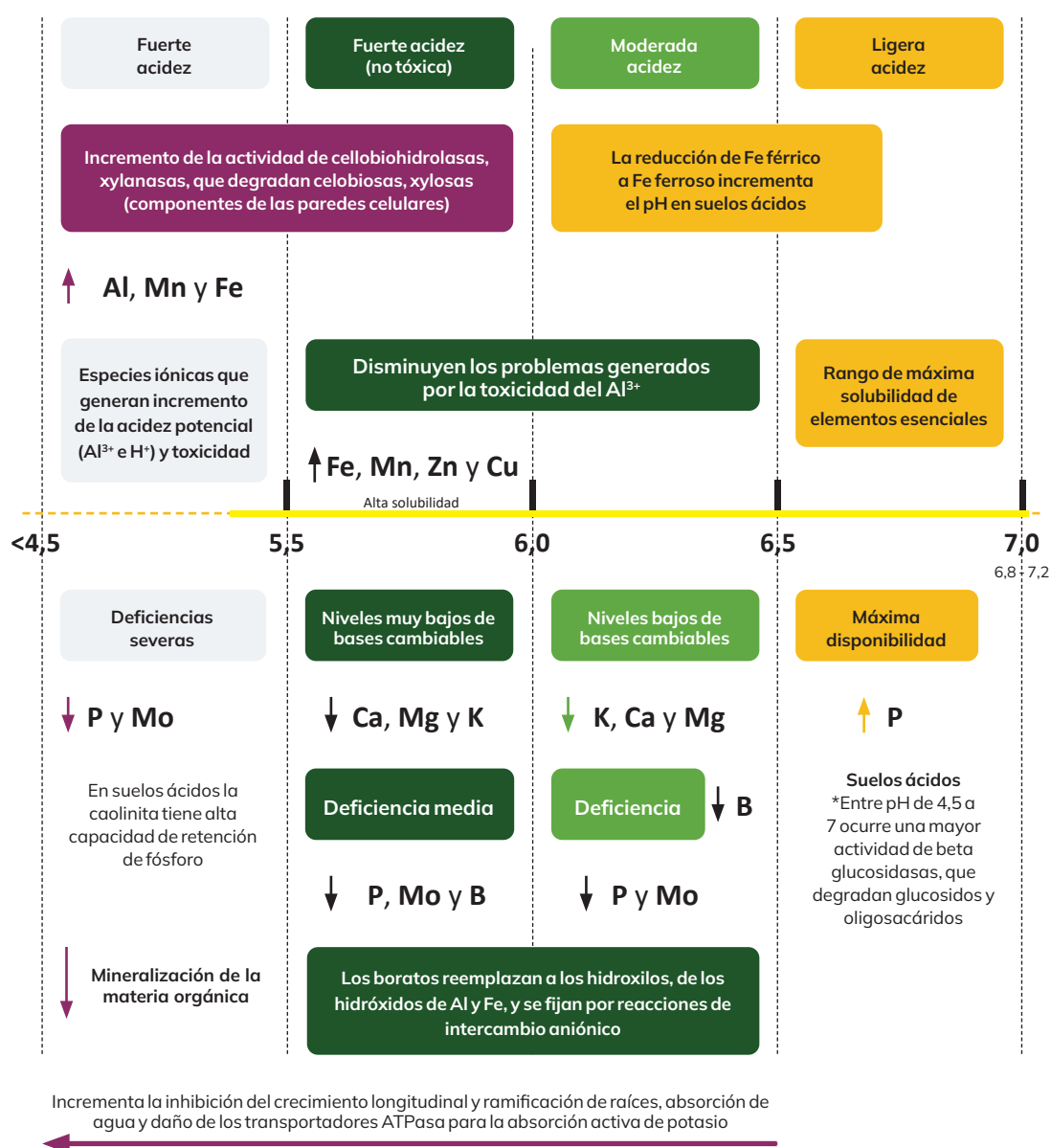
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 12,66 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 21,66 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de cacao es 21,66 kg 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 Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024) y Alam et al. (1999).



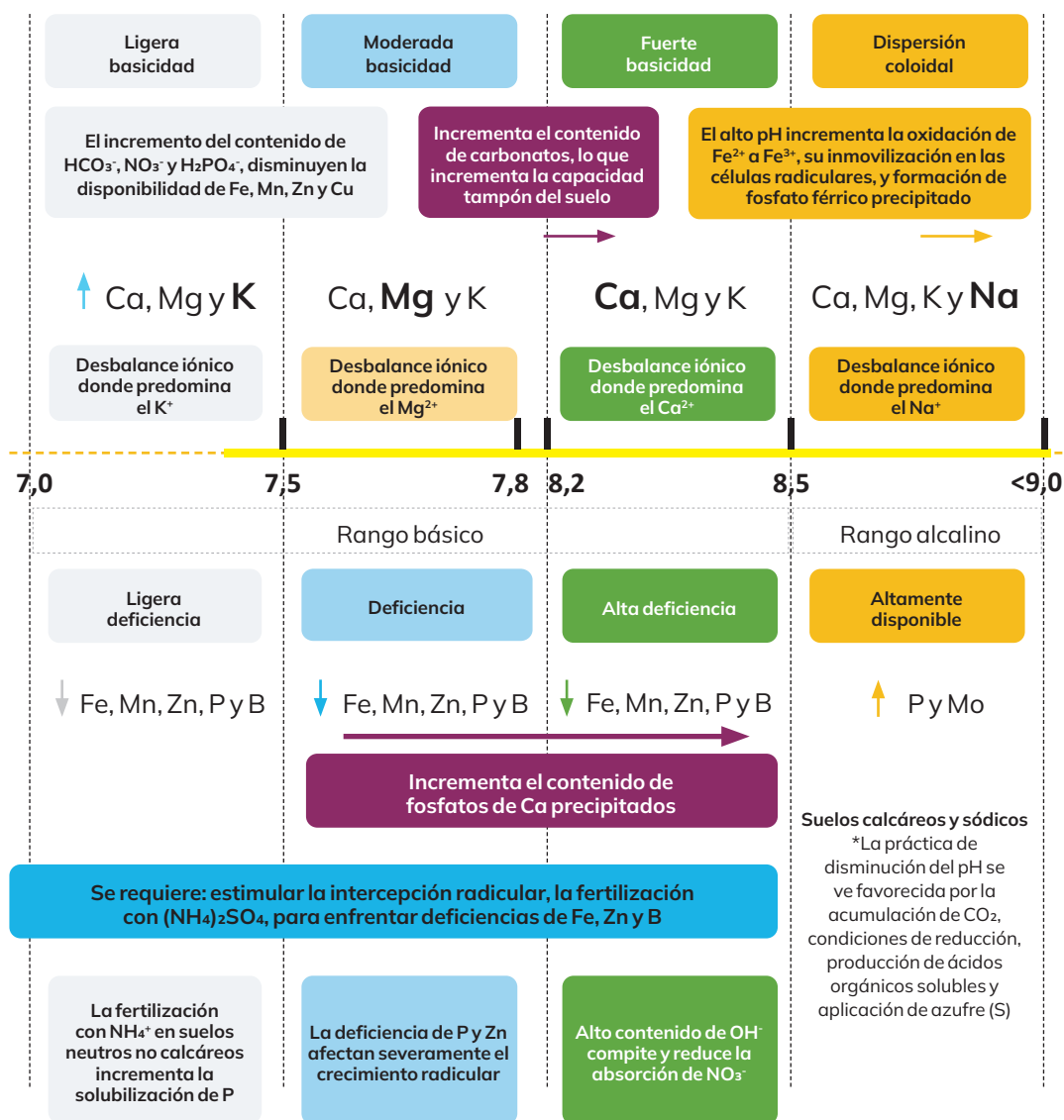


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 empírico (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 Amazonas

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental San Juan de la Frontera (CE San Juan de la Frontera), sede de la EEA Amazonas, ubicado en el distrito de Chachapoyas, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas (Figura 5), con una extensión total de 23,68 ha. El área se sitúa a 2450 m s. n. m. en la región natural Selva Alta, con precipitaciones promedio anuales de 2678 mm y temperaturas medias anuales de 24 °C a 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

En la EEA Amazonas se realizan trabajos de investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios a los agricultores de la región Amazonas. Los cultivos priorizados para estas actividades son: arroz (*Oryza sativa* L.), café (*Coffea arabica* L.), cacao (*Theobroma cacao* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Cruz-Luis et al., 2025).

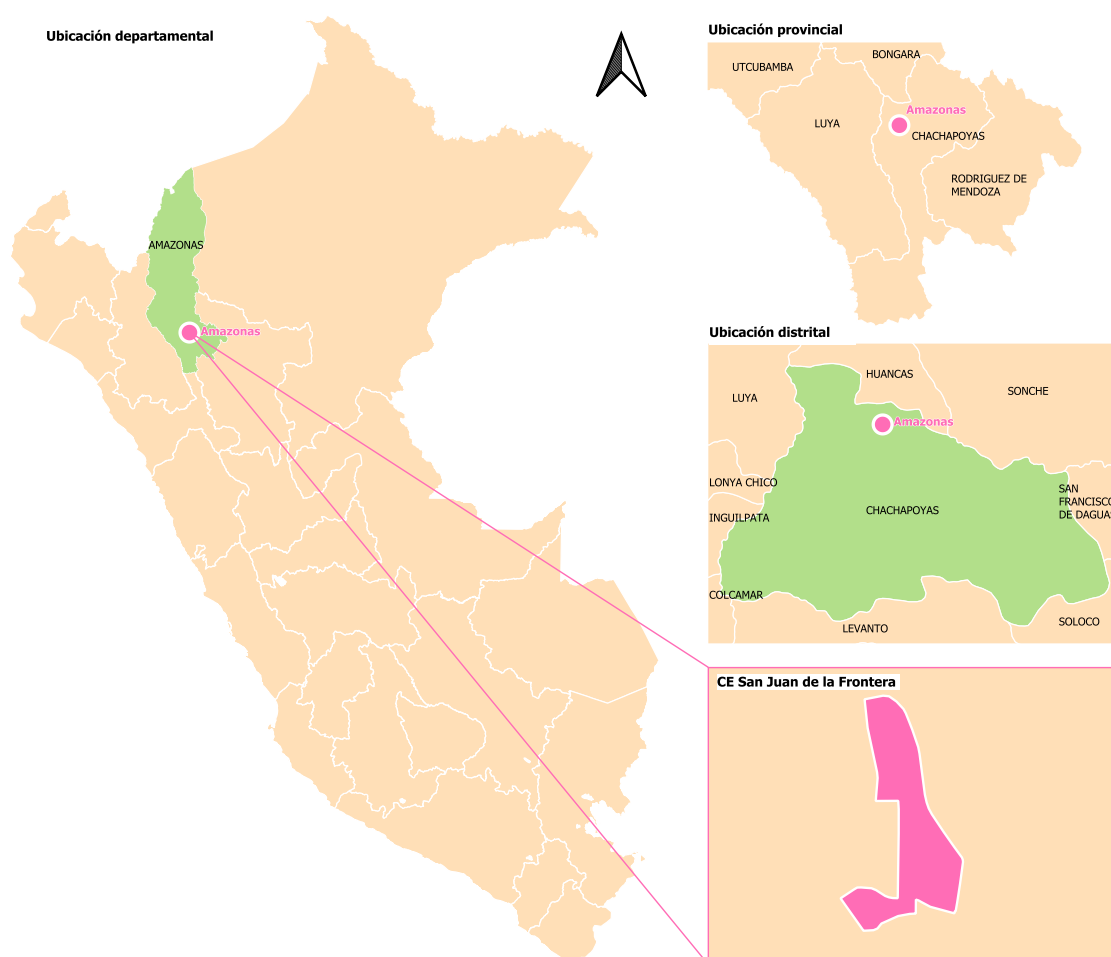


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental San Juan de la Frontera

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en el CE San Juan de la Frontera, 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).

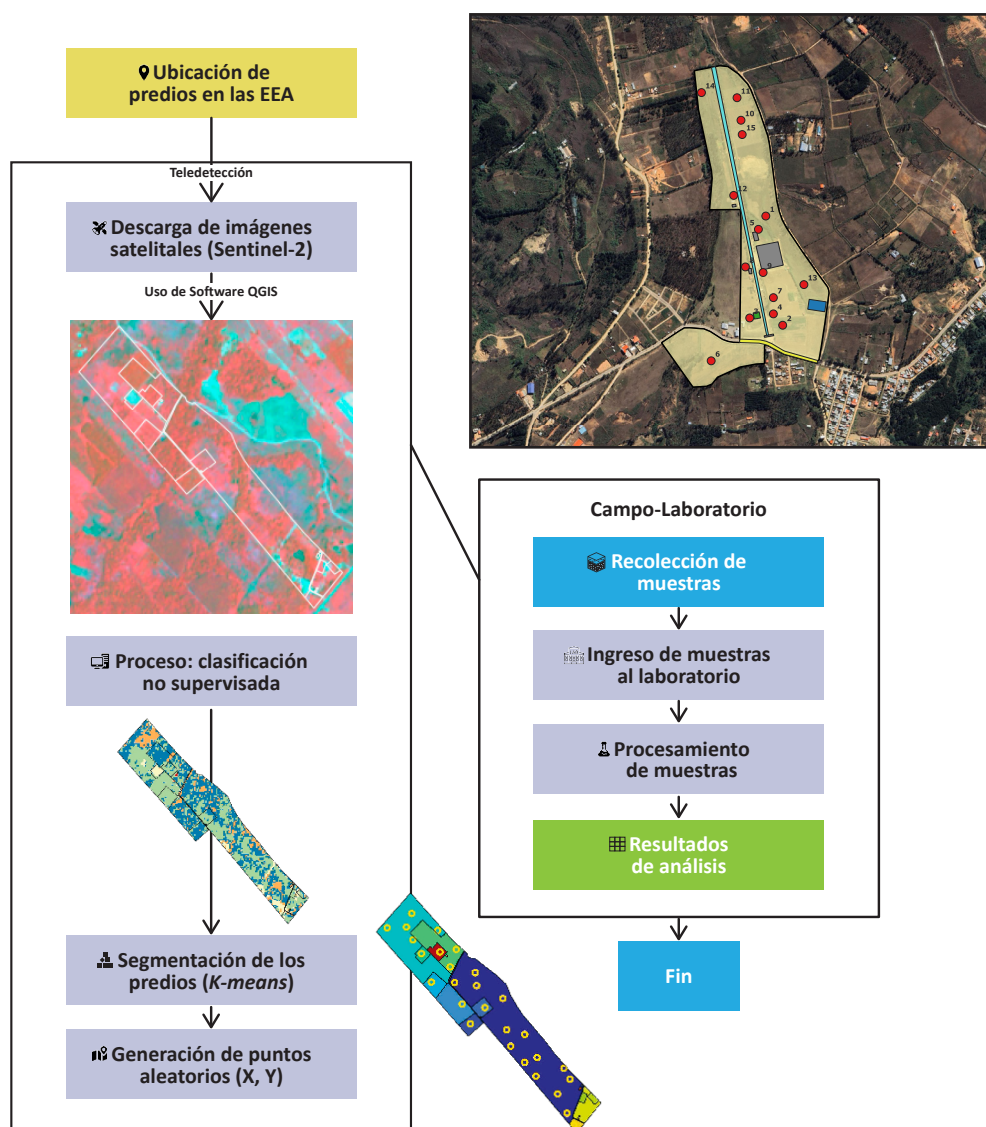


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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) (Figura 6). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 15 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

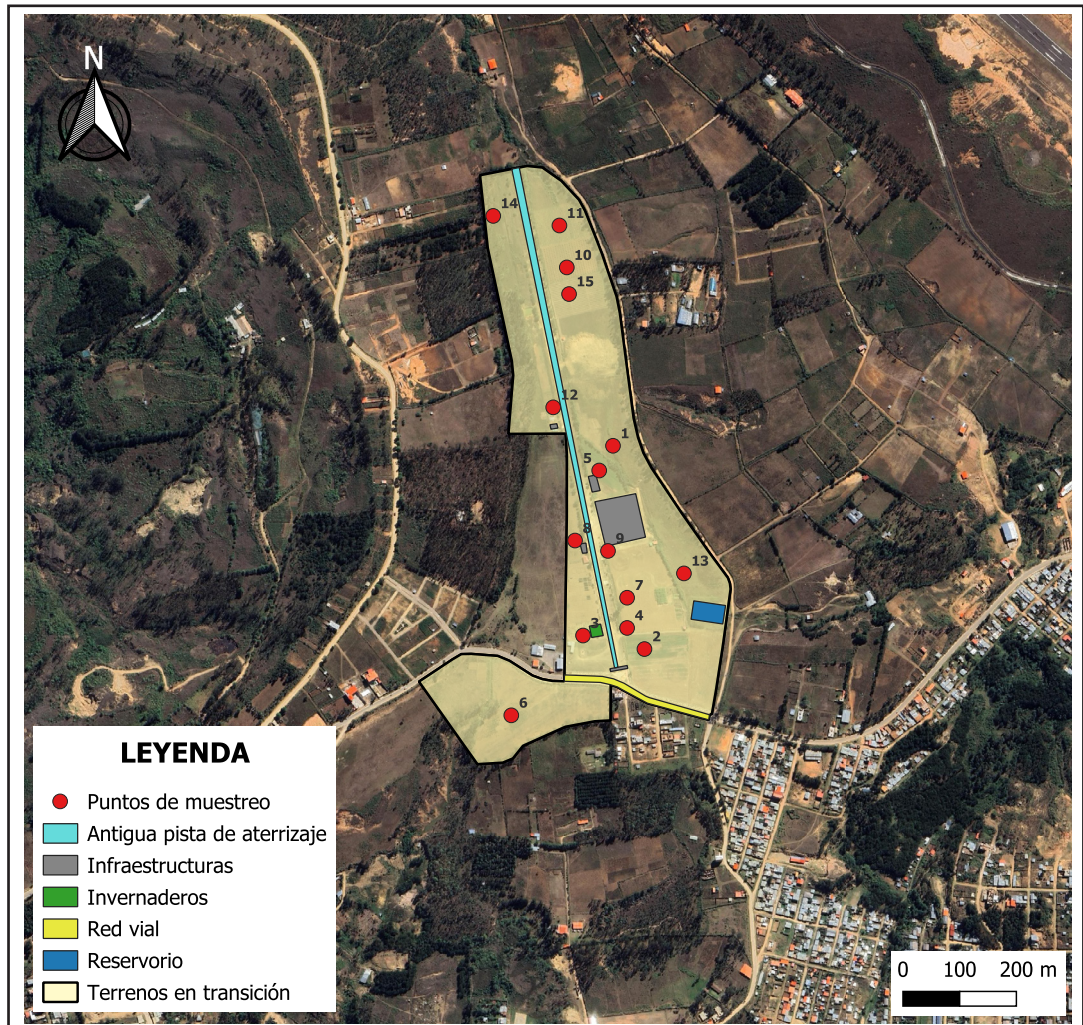


Figura 7. Puntos de muestreo del suelo en el Centro Experimental San Juan de la Frontera de la EEA Amazonas

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 15 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (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, y entre estas colocar la cartilla de identificación.



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta de 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, 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 Foliare de la EEA Amazonas para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C durante 48 horas. 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	Referencias
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 Walkey 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 Olsen	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

Según los datos de la Tabla 2, los suelos de la sede de la EEA Amazonas presentan, en promedio, una textura franco-arenosa, con predominio de la fracción arena (55,72 %; SD = 8,44). Esta condición favorece una infiltración rápida, pero limita la capacidad de retención de agua y nutrientes, especialmente en las zonas con mayor contenido de arena (máximo = 69,30 %). En contraste, los sectores con mayor proporción de arcilla (máximo = 39,20 %) tienden a presentar una mayor capacidad de retención hídrica y nutrimental.

La reacción del suelo es de neutra a ligeramente alcalina (pH medio = 7,53), con valores que oscilan entre 5,60 y 7,90. Se observa una marcada asimetría negativa (*skewness* = -3,00), lo que indica una mayor concentración de valores próximos al límite superior del rango. Esta condición se ve reforzada por la presencia de carbonatos de calcio (CaCO_3 medio = 0,77 %), los cuales pueden limitar la disponibilidad de micronutrientes como hierro, zinc y manganeso en las zonas más alcalinas. En consecuencia, podrían presentarse deficiencias en cultivos sensibles si no se implementan medidas de manejo, como aplicaciones foliares o la acidificación localizada del suelo.

La materia orgánica se encuentra en niveles bajos (media = 1,72 %), con un rango entre 0,30 y 3,00 %, lo que limita la capacidad del suelo para suministrar nitrógeno de manera sostenida, mantener una estructura estable y amortiguar cambios químicos. El contenido de nitrógeno asociado a la materia orgánica (0,89 mg/g en promedio) confirma esta limitante, por lo que se hace necesaria la aplicación de fertilización nitrogenada externa, así como la implementación de estrategias orientadas al incremento del carbono orgánico del suelo.

En cuanto a los macronutrientes disponibles, el fósforo presenta una variabilidad extremadamente alta (media = 20,29 mg kg⁻¹; SD = 24,41), con valores que van desde niveles deficientes (0,90 mg kg⁻¹) hasta muy altos (81,60 mg kg⁻¹), además de una marcada asimetría positiva (*skewness* = 1,70). Este comportamiento sugiere un patrón heterogéneo, probablemente asociado a aplicaciones históricas localizadas, lo que hace necesario un diagnóstico por zonas antes de formular recomendaciones de manejo. Por su parte, el potasio disponible también muestra una alta variabilidad (media = 133,59 mg kg⁻¹; SD = 74,65), con valores entre 40,80 y 326,40 mg kg⁻¹. Esto indica la coexistencia de áreas con deficiencia y otras con niveles elevados, lo que refuerza la necesidad de un manejo diferencial del nutriente.

Desde la perspectiva de la fertilidad, la estación requiere un enfoque basado en zonas de manejo, donde el muestreo y la interpretación se realicen por unidades homogéneas previamente definidas. En este contexto, las acciones prioritarias incluyen el incremento progresivo de la materia orgánica mediante prácticas como el compostaje, el uso de cultivos de cobertura y la reincorporación de residuos de cosecha. Asimismo, se recomienda diseñar aplicaciones de fósforo de manera localizada y, cuando sea necesario, implementar programas de construcción de reservas en sectores con niveles bajos. En el caso del potasio, su aplicación debe restringirse a aquellas áreas donde el diagnóstico evidencie deficiencia. Finalmente, es fundamental integrar un monitoreo periódico del suelo y del agua de riego, complementado con análisis foliar en cultivos sensibles, como parte de un sistema de manejo adaptativo. Este enfoque permitirá transitar de recomendaciones generalizadas hacia estrategias zonales más precisas, optimizando la eficiencia en el uso de fertilizantes, reduciendo riesgos ambientales y fortaleciendo la sostenibilidad de la producción en la EEA Amazonas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros físicoquímicos del suelo analizados en la EEA Amazonas

Variable	Unidad	Media	SD	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	55,72	8,44	57	41	69,3	-0,22
Limo	%	14,39	3,86	13,9	7,9	21,7	0,33
Arcilla	%	29,92	5,73	29	21,1	39,2	0,19
pH	und	7,53	0,58	7,7	5,6	7,9	-3
CEe	dS m ⁻¹	0,71	0,29	0,7	0,16	1,42	0,57
MO	%	1,72	0,73	1,9	0,3	3	-0,22
CaCO ₃	%	0,77	0,49	0,7	0,3	1,8	1,16
N - MO	mg/g	0,89	0,36	1	0,2	1,5	-0,29
P disp.	mg kg ⁻¹	20,29	24,41	9,6	0,9	81,6	1,7
K disp.	mg kg ⁻¹	133,59	74,65	115,5	40,8	326,4	1,56
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	15,23	5,38	17,2	2,2	21,8	-1,31
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	0,51	0,31	0,4	0,1	1,3	1,09
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0,63	0,2	0,6	0,4	1,1	1,32
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0,58	0,1	0,6	0,3	0,7	-1,44
Ac. Int.	cmol kg ⁻¹	<0,4	0	<0,4	<0,4	<0,4	-
Al Int.	cmol kg ⁻¹	<0,4	0	<0,4	<0,4	<0,4	-
CICe	cmol kg ⁻¹	17,15	5,76	19	3,4	23,9	-1,26
PCI	%	87,21	6,83	89,69	64,71	91,35	-2,94
PMI	%	2,88	1,24	2,94	1,03	6,02	1,1
PPI	%	4,23	2,28	3,68	2,51	11,76	2,88
PSI	%	4,16	3,1	3,09	2,51	14,71	3,24

SD: desviación estándar, *Skewness*: asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, Ac. Int.: acidez intercambiable, Al. Int.: aluminio intercambiable, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable

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 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 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 los 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:

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

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

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 **Sill-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 **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).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_1(X_i) - Z_2(X_i)]^2} \quad \dots(10)$$

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. **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.

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

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.

3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades físico-químicas del suelo

Los resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo en la EEA Amazonas se observan en la Tabla 3 y revelan un patrón espacial diferenciado que permite clasificar las variables según su grado de predictibilidad y, por tanto, su utilidad para la zonificación y el manejo preciso.

Entre las variables con mayor consistencia espacial se tiene la conductividad eléctrica y potasio disponible. La conductividad eléctrica tiene un modelo lineal, alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,74$) y una autocorrelación espacial hasta los 373 m, lo que permite mapear con confianza las zonas con riesgo de salinidad ($CE > 1,0 \text{ dS m}^{-1}$) para dirigir prácticas de lixiviación y manejo de riego. Por otro lado, el potasio disponible tiene modelo exponencial, un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,76$), a pesar de un *nugget* considerable ($C_0 = 873,79$), y un alcance de 479,8 m, por lo que su alta predictibilidad la convierten en una variable clave para la fertilización variable, permitiendo identificar zonas de deficiencia ($< 100 \text{ mg kg}^{-1}$) y suficiencia ($> 200 \text{ mg kg}^{-1}$) con alta certeza.

Las fracciones texturales de arena y limo se ajustan a un modelo gaussiano con alcances cercanos a 477 m. Aunque presentan coeficientes de determinación moderados ($R^2 = 0,23$ y $0,37$, respectivamente), su estructura espacial bien definida les confiere utilidad como covariables para la predicción de otras propiedades del suelo, así como para la delimitación de zonas de manejo hídrico y de retención de nutrientes.

En el caso del pH, se observa un muy bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0,05$), lo que indica una débil capacidad del modelo para explicar su variabilidad espacial. Aunque el semivariograma presenta un alcance de 332 m, la baja calidad del ajuste sugiere que esta estructura espacial no es representada adecuadamente por el modelo. En consecuencia, la interpolación directa del pH resulta poco confiable y debe interpretarse con cautela.

Desde un enfoque avanzado de fertilidad del suelo, si bien el análisis geoestadístico realizado permitió la elaboración de mapas temáticos, la baja dependencia espacial observada en algunas variables sugiere la necesidad de fortalecer el diseño de muestreo mediante el incremento de la densidad de puntos. Asimismo, resulta pertinente complementar las interpolaciones con análisis multivariados y procesos de validación en campo, con el fin de mejorar la precisión y confiabilidad de los mapas generados para el manejo sitio-específico y la aplicación de enmiendas en el área de estudio.

En síntesis, la sede de la EEA Amazonas cuenta con un conjunto de propiedades con alto grado de ajuste predictivo, lo que permite desarrollar una zonificación de la fertilidad sustentada en evidencia espacial. El aprovechamiento de estas variables como base de la cartografía, junto con la aplicación de técnicas avanzadas (como la regresión-*kriging*, el *co-kriging* y la integración de sensores proximales), facilita la estimación de propiedades con baja estructura espacial.

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

Variable	Model	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Gaussian</i>	32,64	86,69	476,81	7,25	0,23
Limo	<i>Gaussian</i>	5,85	24,59	476,81	2,97	0,37
Arcilla	<i>Linear to sill</i>	5,06	31,5	232,9	5,12	0,2
pH	<i>Gaussian</i>	3×10^{-3}	0,09	331,9	0,24	0,05
CEe	<i>Linear</i>	0,09	0,09	372,77	0,31	0,74
MO	<i>Spherical</i>	4×10^{-3}	0,71	282,96	0,59	0,33
CaCO ₃	<i>Exponential</i>	0,25	0,18	476,8	0,58	0,14
N-MO	<i>Linear to sill</i>	3×10^{-3}	0,17	233,16	0,3	0,31
P disp.	<i>Spherical</i>	4×10^{-3}	414,38	261,47	22,62	0,17
K disp.	<i>Exponential</i>	873,79	5151,16	479,79	78,32	0,76
Ca ²⁺	<i>Spherical</i>	4×10^{-3}	34,94	296,42	6,71	0,02
Mg ²⁺	<i>Linear to sill</i>	0,04	0,06	426,22	0,26	0,17
K ⁺	<i>Exponential</i>	4×10^{-3}	0,06	424,41	0,25	0,32
Na ⁺	<i>Linear</i>	0,01	0,01	476,79	0,07	0,53
CICe	<i>Gaussian</i>	3,14	39,33	222,81	8,14	0,09
PCI	<i>Gaussian</i>	3×10^{-3}	12,41	303,76	5,76	0,04
PMI	<i>Linear to sill</i>	0,01	1,1	231,84	0,87	0,09
PPI	<i>Spherical</i>	4×10^{-3}	1,17	365,49	0,91	0,09
PSI	<i>Linear to sill</i>	3×10^{-3}	1,46	246,52	1,38	0,14

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Amazonas (Figuras 9-27) reflejan la marcada heterogeneidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, con implicancias directas en la fertilidad y en el manejo de los cultivos en la estación.

Los mapas de propiedades texturales muestran una variabilidad espacial diferenciada dentro del área de estudio. El mapa de arena (Figura 9) evidencia los mayores porcentajes en la zona 5 (60,65-69,30 %), concentrados en una amplia franja del centro del predio, mientras que los valores más bajos, correspondientes a la zona 1 (41-49,56 %), se ubican hacia el extremo del área. Esta distribución, modelada mediante un ajuste gaussiano con un alcance espacial cercano a 477 m, sugiere una transición gradual entre sectores más arenosos y menos arenosos. En el caso del limo (Figura 10), se observa una distribución relativamente homogénea, aunque con pequeños parches de mayor contenido hacia el norte, asociados también a la zona 5 (18,37-21,70 %). Por su parte, la arcilla (Figura 11) presenta mayores concentraciones en el noreste, dentro de la zona 5 (35,38-39,20 %), en contraste con el sur del predio, donde disminuye a rangos de 21,10-25,81 % (zona 1). En conjunto, estos mapas texturales permiten identificar áreas con potencial drenaje deficiente y otras con drenaje más rápido, lo cual influye directamente en la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

El mapa de pH (Figura 12) evidencia un patrón espacial definido, en el cual la mayor parte del terreno presenta condiciones ligeramente a moderadamente alcalinas, destacando la zona 3 (7,25-7,47), la zona 4 (7,47-7,69) y la zona 5 (7,69-7,90). En contraste, la zona 1, ubicada en el suroeste del predio, muestra una disminución marcada del pH, con valores entre 5,60 y 7,02, alcanzando condiciones moderadamente ácidas. Esta variabilidad es relevante desde el punto de vista agronómico, ya que en el sector ácido podrían presentarse problemas de disponibilidad o toxicidad de nutrientes, mientras que en las zonas alcalinas se recomienda monitorear la disponibilidad de micronutrientes como hierro y zinc, cuya absorción puede verse limitada en estos rangos de pH.

El mapa de conductividad eléctrica (Figura 13) permite identificar un sector localizado al sur del área de estudio, correspondiente a la zona 5 (0,72-1,42 dS/m), donde se registran los valores más elevados de conductividad eléctrica. Sin embargo, pese a superar 1,4 dS/m, estos niveles no representan riesgo de salinidad para el suelo.

En el caso de la materia orgánica (Figura 14), el mapa evidencia dos zonas claramente diferenciadas: una franja central con contenidos muy bajos, correspondiente a la zona 1 (0,30-0,85 %), y sectores con contenidos medios ubicados en la zona 5 (2,45-3,00 %). Esta distribución resulta relevante para la planificación de la aplicación de enmiendas orgánicas y el manejo diferenciado del suelo. De manera similar, el mapa de nitrógeno estimado a partir de la materia orgánica (Figura 16) presenta un patrón espacial comparable, con áreas de baja y alta disponibilidad, lo que permite orientar de manera más eficiente la fertilización nitrogenada en el área de estudio.

Uno de los mapas más relevantes corresponde al fósforo disponible (Figura 17), el cual evidencia una marcada variabilidad espacial. Aunque la mayor parte del área presenta contenidos bajos, asociados a la zona 1 (0,90-11,95 mg/kg), se identifica un sector muy localizado perteneciente a la zona 5 (50,81-81,60 mg/kg), donde las concentraciones superan los 80 mg/kg, posiblemente como resultado de aplicaciones previas de fertilizantes fosfatados. Por otro lado, el mapa de potasio disponible (Figura 18) muestra un gradiente espacial definido, en el que los valores más elevados se concentran en una pequeña área central correspondiente a la zona 5 (176,46-326,40 mg/kg). Esta distribución permite orientar estrategias de fertilización potásica variable y un manejo más eficiente de los nutrientes en el área de estudio.

En cuanto a los cationes intercambiables, el mapa de calcio intercambiable (Figura 19) revela que las áreas con mayor contenido, pertenecientes a la zona 5 (17,76-21,80 cmol/kg), se ubican en el norte, mientras que las áreas con menor contenido, se encuentra en la zona 1 (2,20-6,24 cmol/kg) en el centro del mapa. En el caso del mapa de magnesio intercambiable (Figura 20) los valores altos y bajos se encuentran en el norte y sur, respectivamente. Además, el mapa de potasio intercambiable (Figura 21) presenta valores muy bajos pertenecientes a la zona 1 (0,40-0,54 cmol/kg) y zona 2 (0,54-0,68 cmol/kg), con máximos en el centro (zona 5).

El mapa de capacidad de intercambio catiónico efectiva (Figura 23) evidencia una clara diferenciación espacial entre las áreas con distintas concentraciones. En particular, el sector noroeste del predio, correspondiente a la zona 5 (19,54-23,90 cmol/kg), presenta los valores más altos de CICE en comparación con el resto de las áreas; sin embargo, estos valores aún se consideran bajos para este parámetro.

Con respecto a los porcentajes de saturación de bases (Figuras 24-27), estos permiten identificar posibles desbalances iónicos en el suelo. El mapa de porcentaje de calcio intercambiable (Figura 24) muestra que las zonas 2 (81,27-83,70 %), 3 (83,70-86,14 %), 4 (86,14-88,57 %) y 5 (88,57-91,35 %) presentan altos porcentajes de saturación de calcio, lo que podría generar competencia con otros cationes y afectar su disponibilidad. Por su parte, el mapa de porcentaje de magnesio intercambiable (Figura 25) evidencia una distribución heterogénea, con valores que varían desde la zona 5 (3,83-6,02 %) en el suroeste hasta la zona 1 (1,03-1,74 %) en el centro del predio; en general, estos porcentajes son bajos para el magnesio, por lo que podrían inducir una relación Ca/Mg desfavorable para algunos cultivos. En contraste, el mapa de porcentaje de potasio intercambiable (Figura 26) presenta valores elevados en la zona 5 (5,03-11,76 %) ubicada al suroeste, condición que podría ocasionar inhibición en la absorción de magnesio debido a antagonismos catiónicos. Finalmente, el mapa de porcentaje de sodio intercambiable (Figura 27) muestra que predominan niveles asociados a un bajo riesgo de sodicidad ($PSI < 5\%$).

Desde el punto de vista agronómico, los mapas de la sede de la EEA Amazonas constituyen una herramienta estratégica para la delimitación de unidades de manejo basadas en variables con alta confiabilidad predictiva, como la CE y el K disponible. En contraste, las variables con menor capacidad predictiva (pH, CaCO_3 , Ca^{2+} , CICE, PCI, PMI, PPI, entre otras) requieren complementarse con técnicas geoestadísticas avanzadas (*kriging* con regresión o el *kriging* universal), utilizando las variables CE y K disponible como covariables, o bien mediante un muestreo más denso en zonas homogéneas. Este enfoque permite diseñar prácticas de fertilización sitio-específica y estrategias de conservación del carbono edáfico, favoreciendo un mejor equilibrio entre productividad y sostenibilidad en los predios experimentales de la estación.

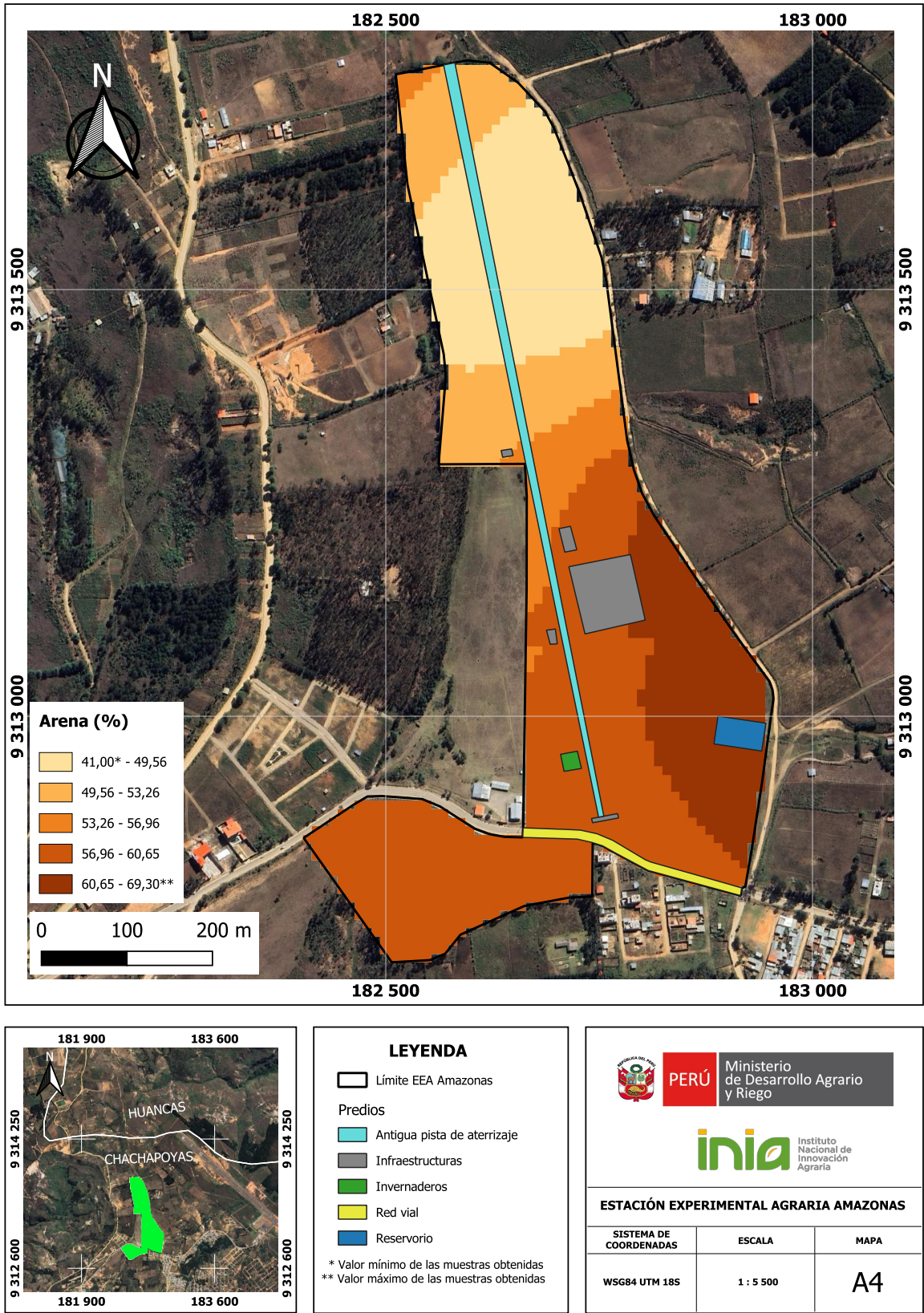


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

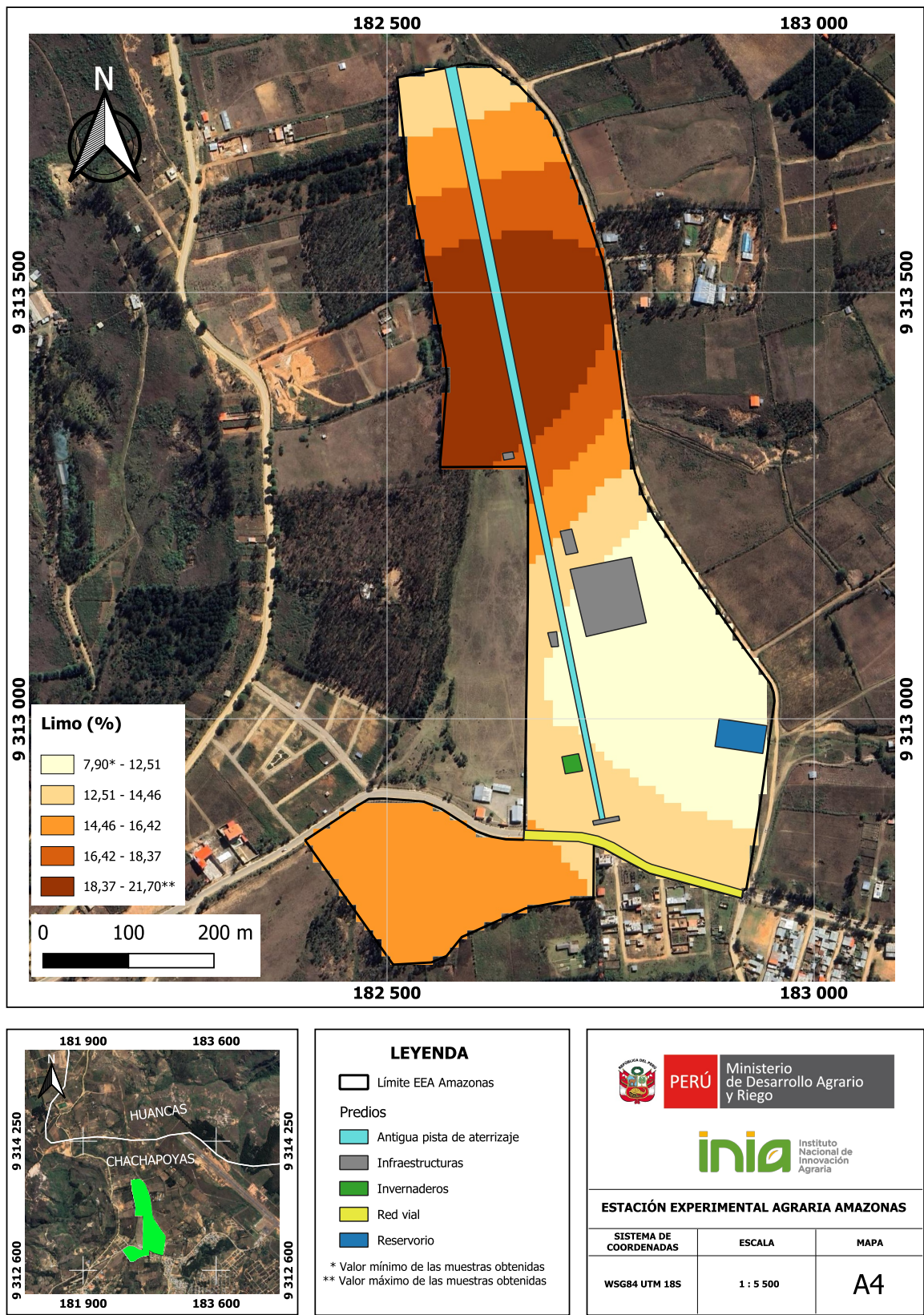


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

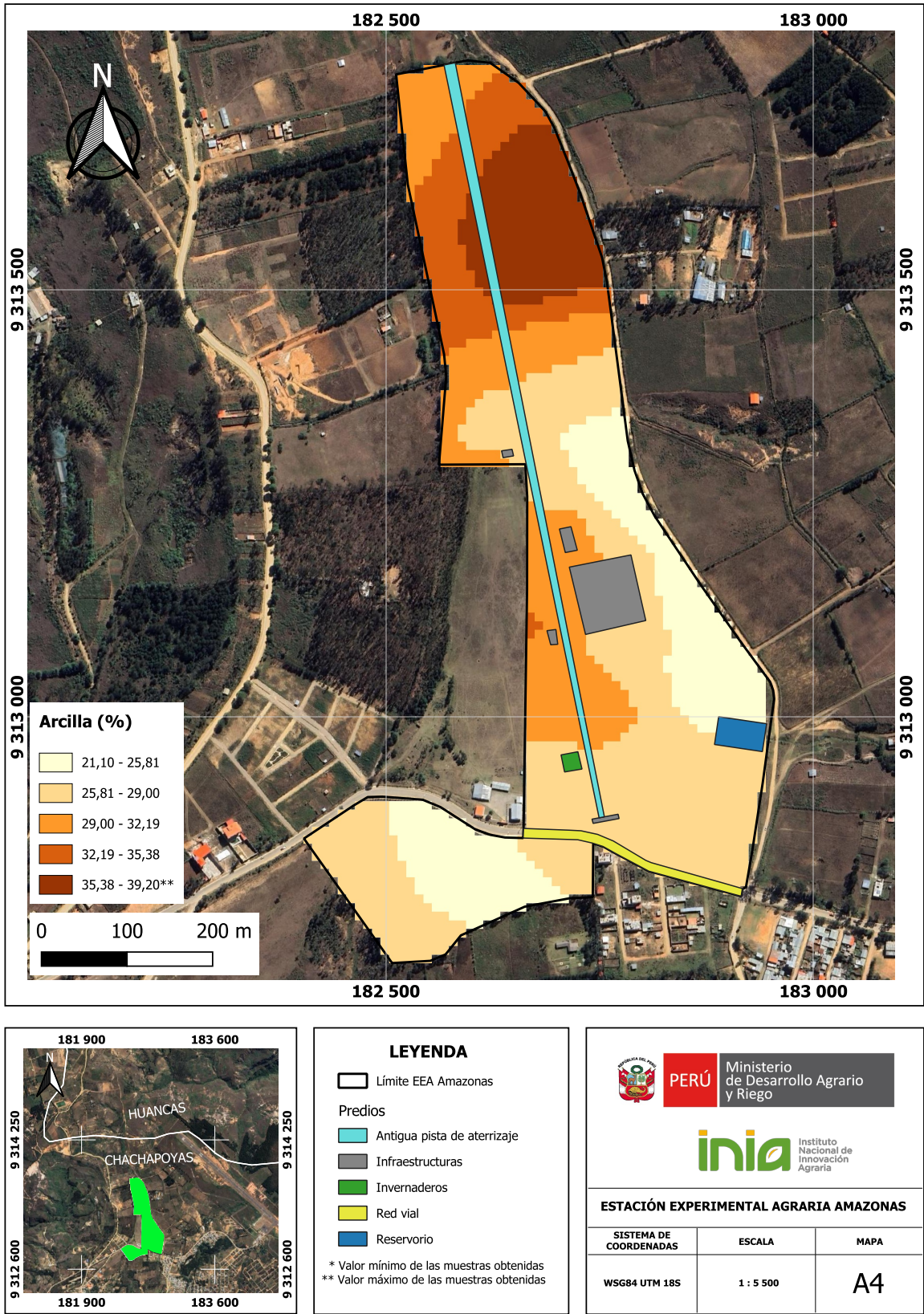


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

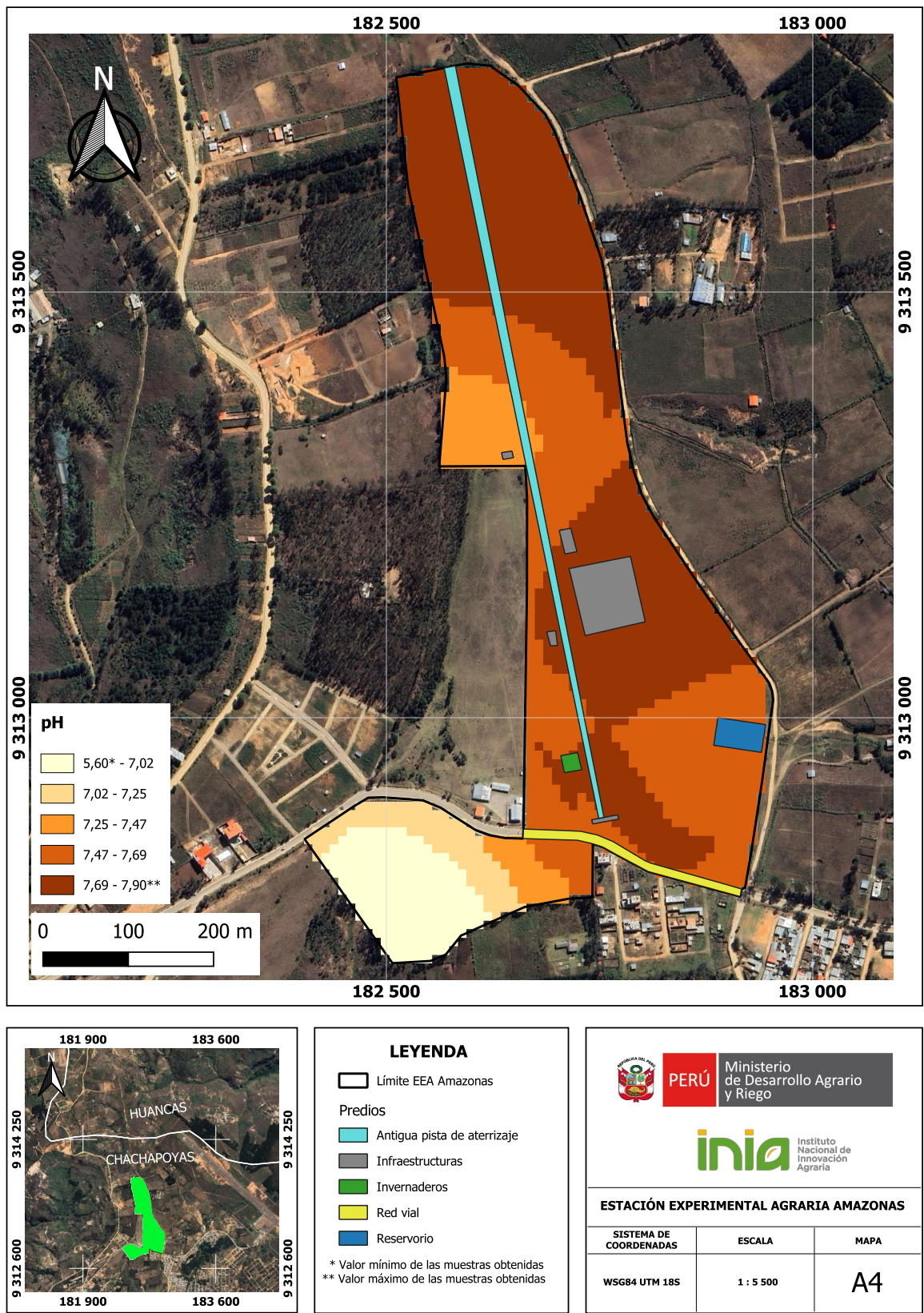


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

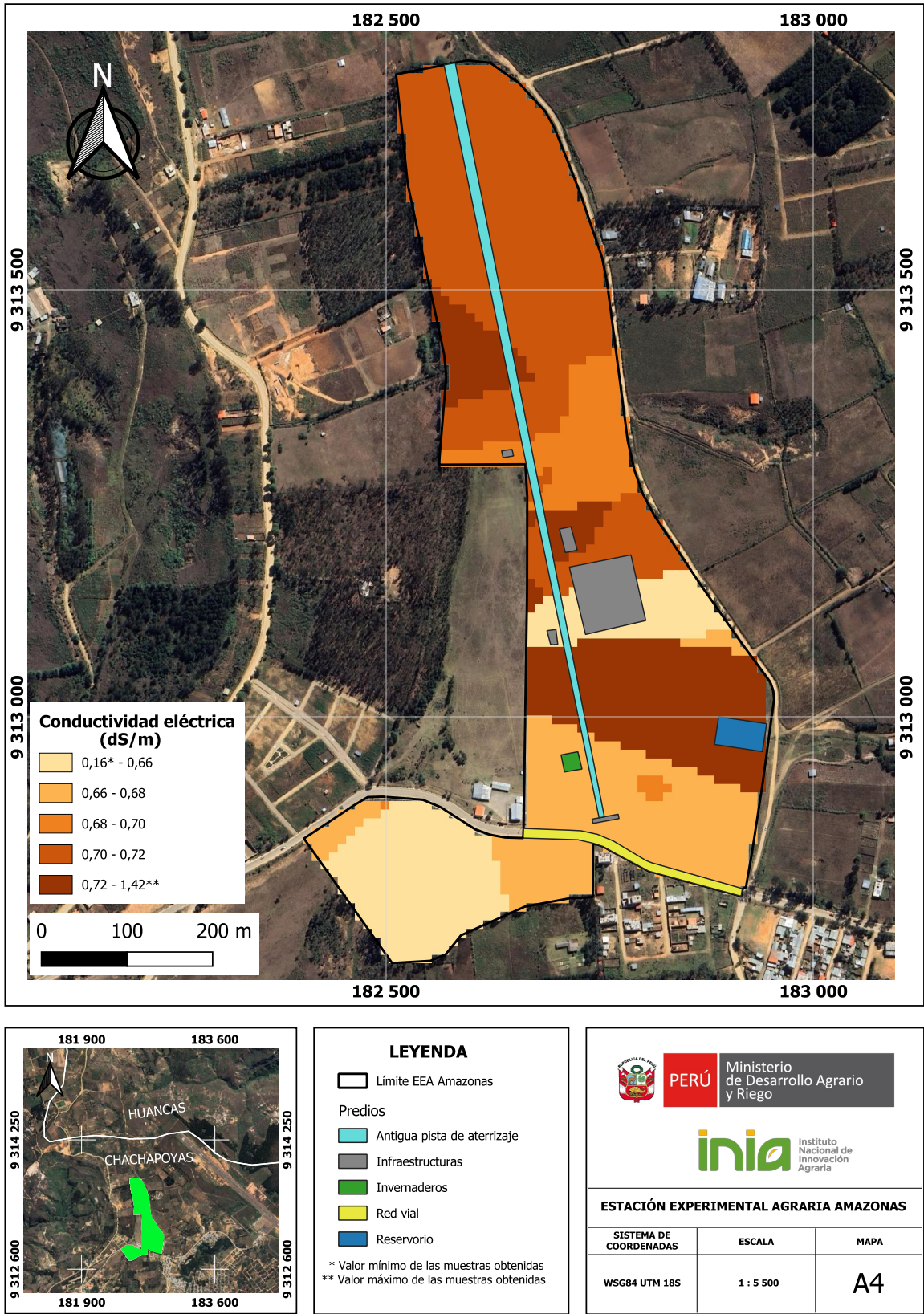


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

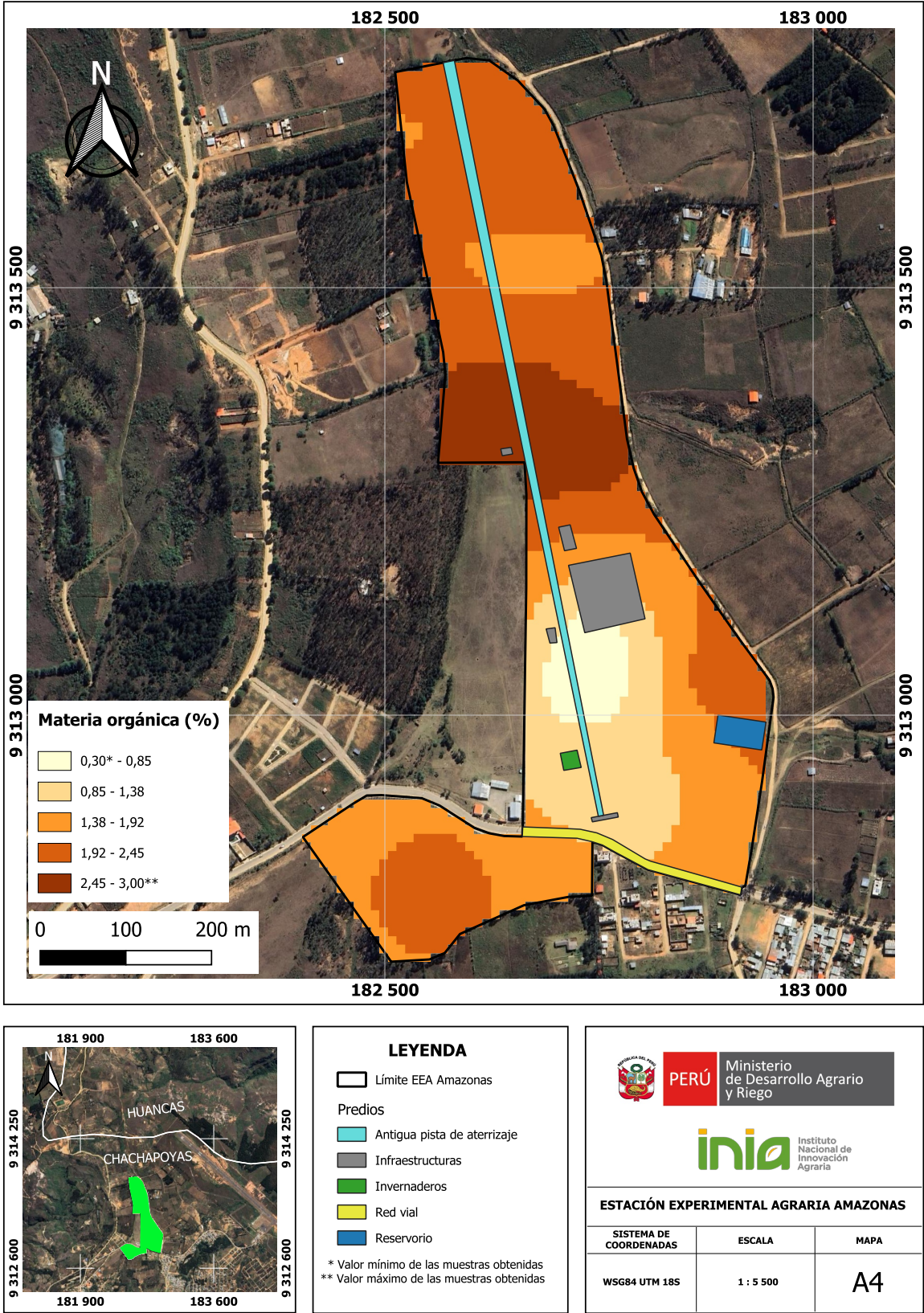


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

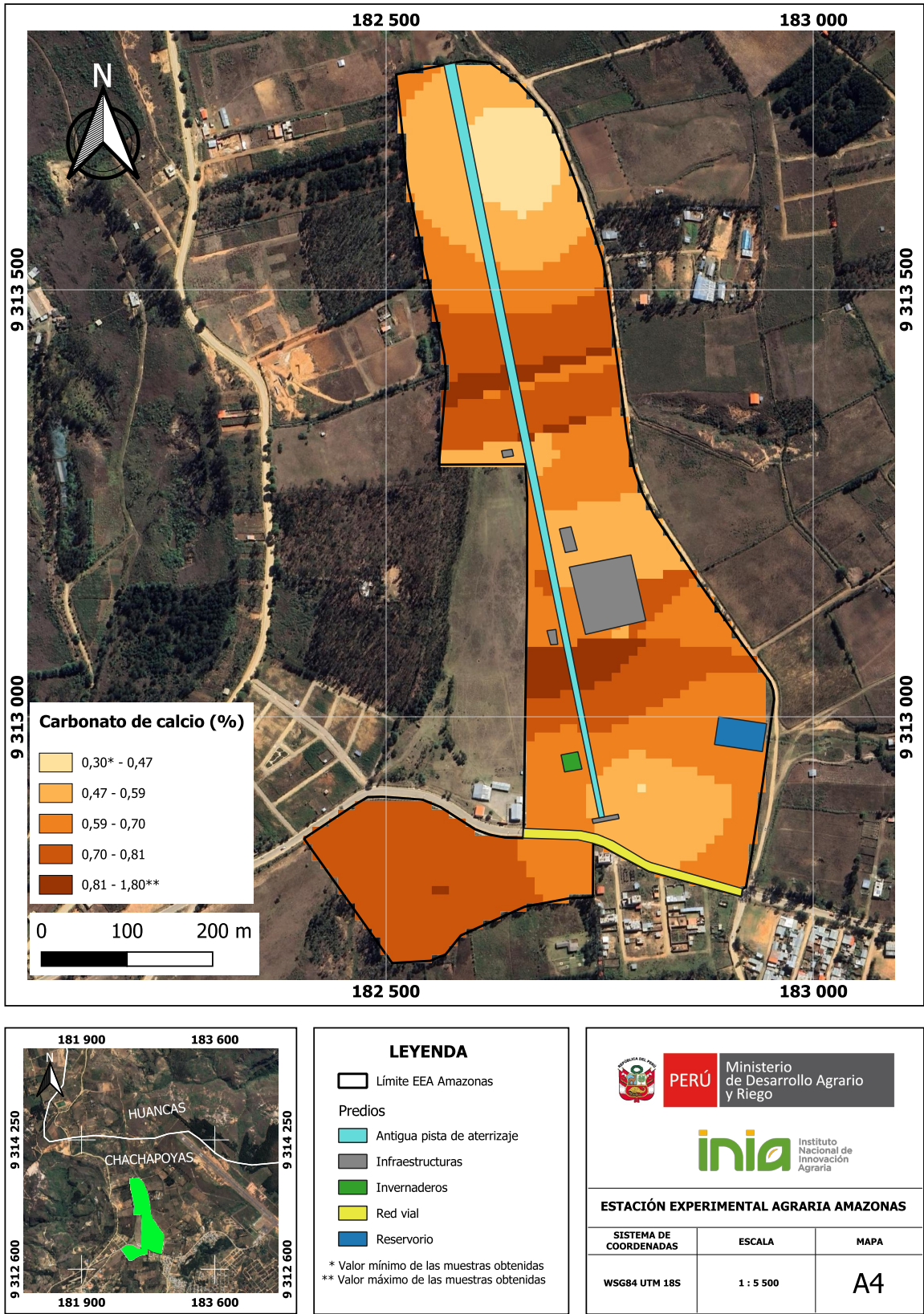


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

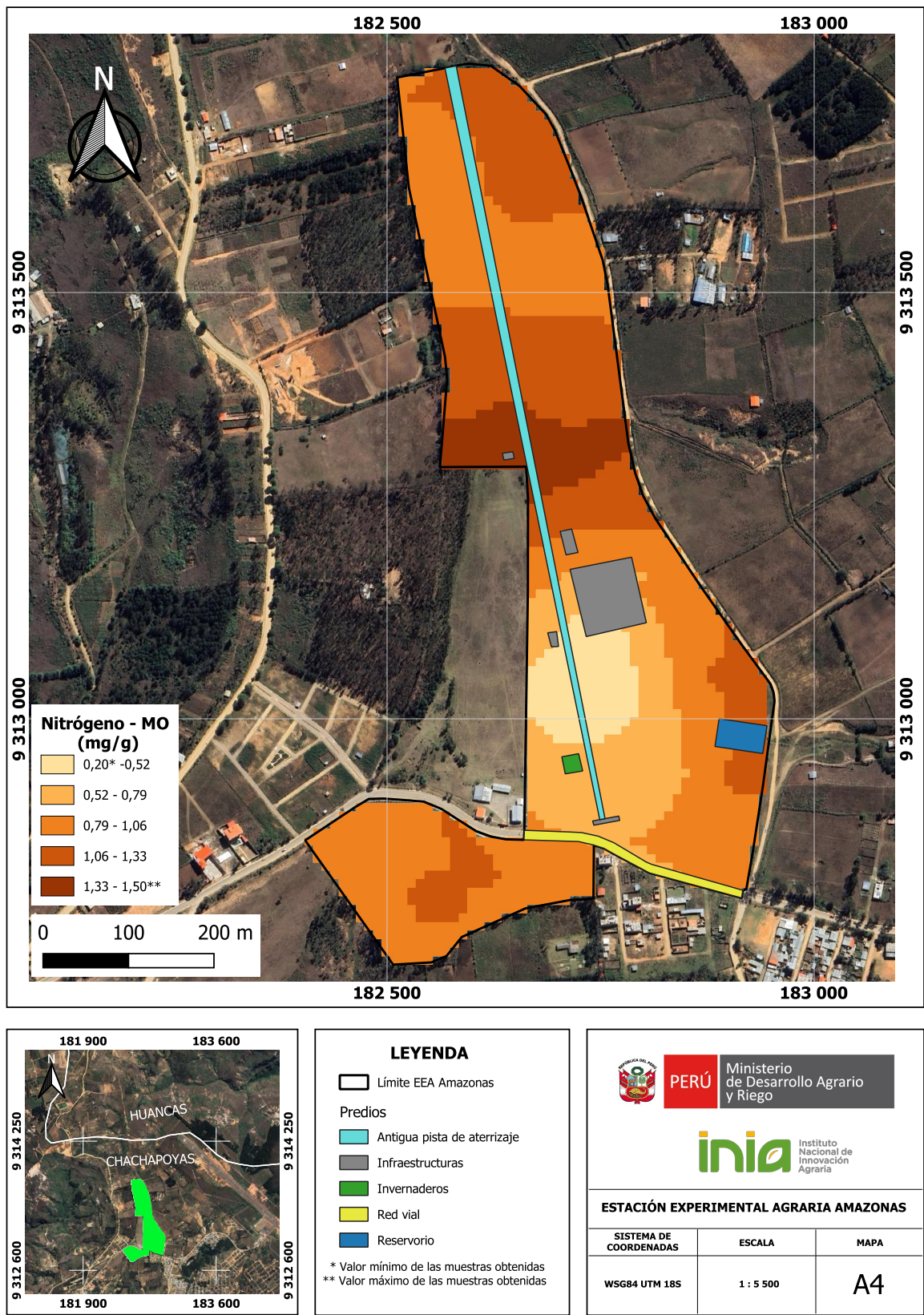


Figura 16. Mapa de variación espacial del nitrógeno obtenido a partir de la materia orgánica

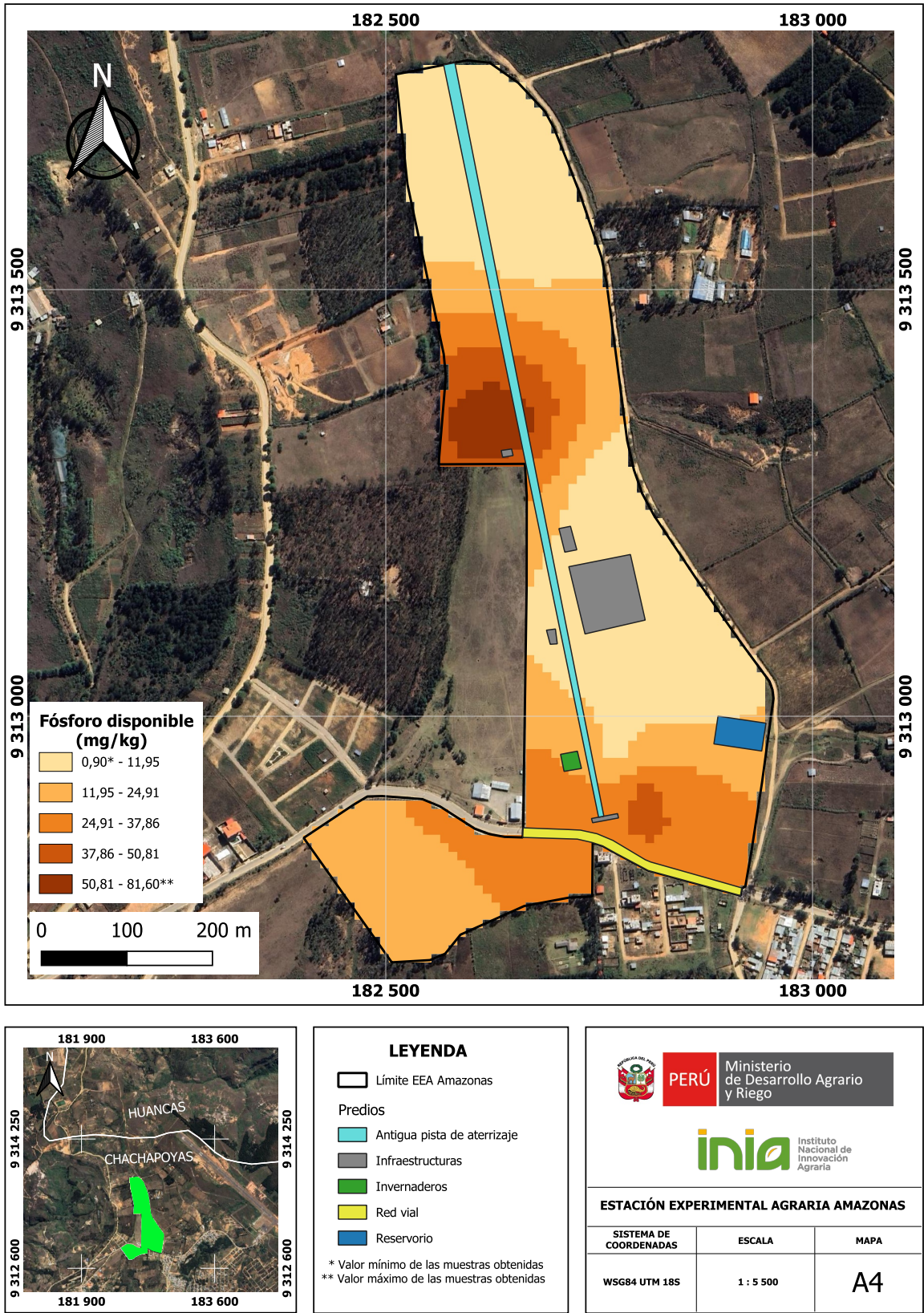


Figura 17. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

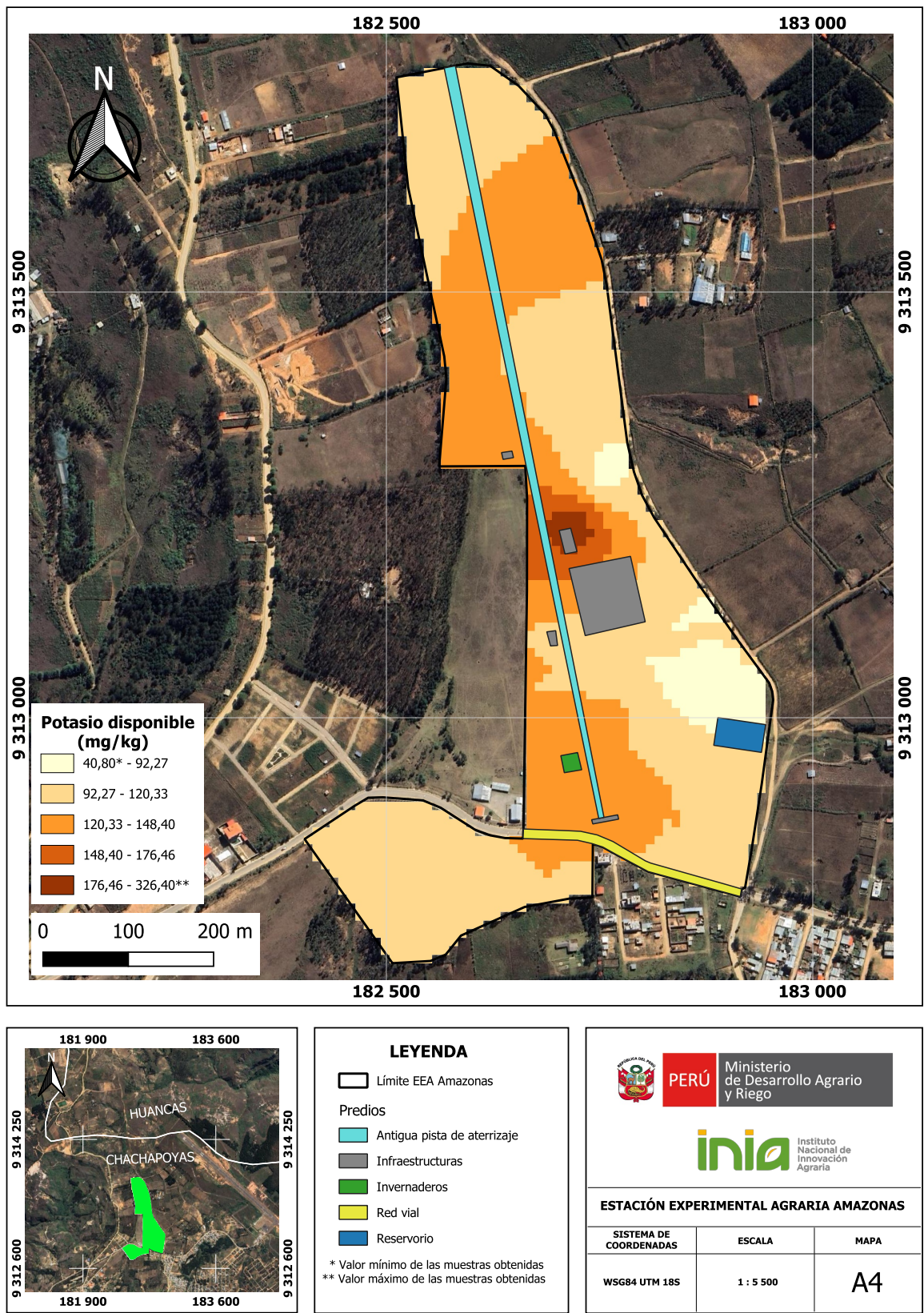


Figura 18. Mapa de variación espacial del potasio disponible

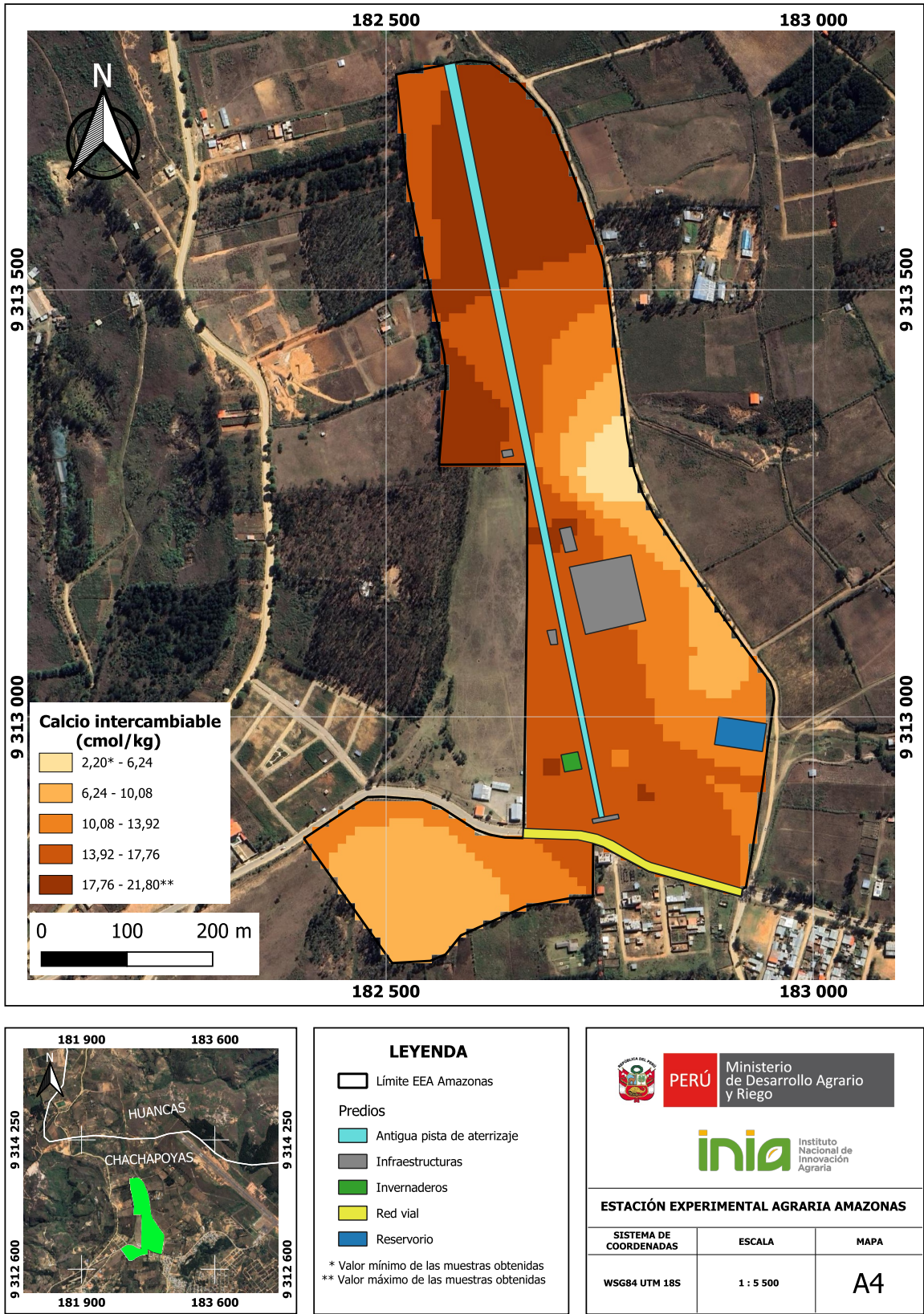


Figura 19. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

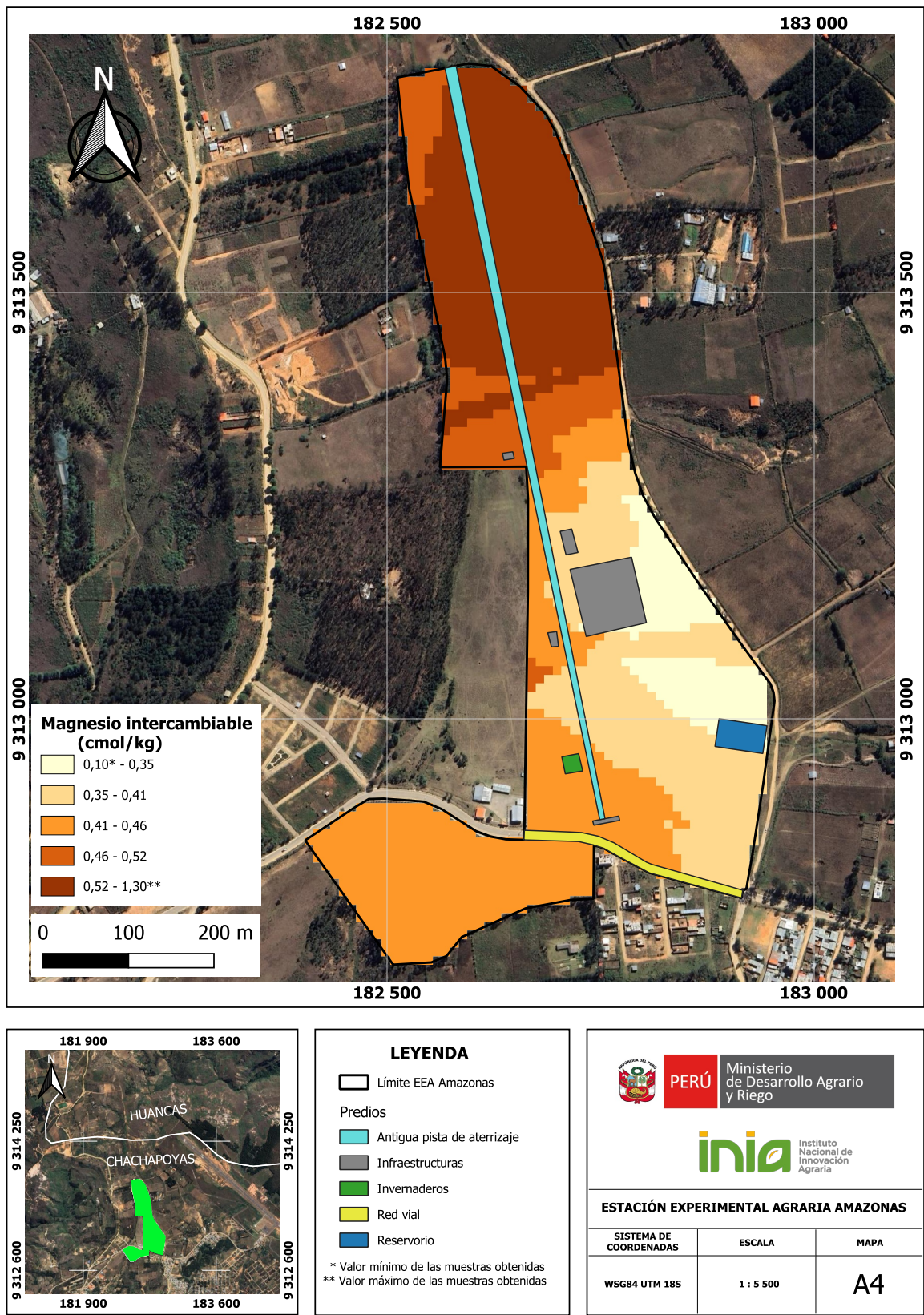


Figura 20. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

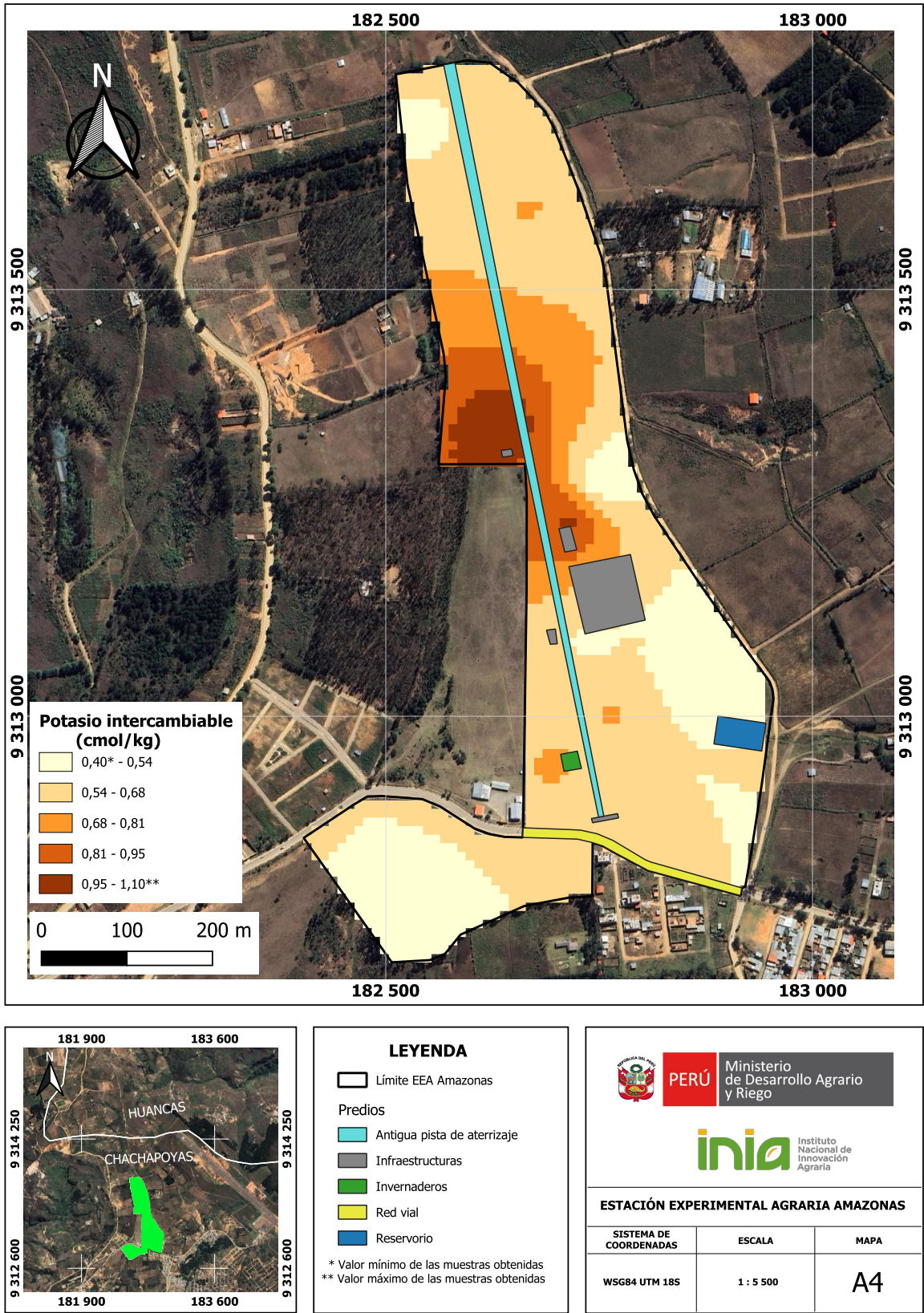


Figura 21. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

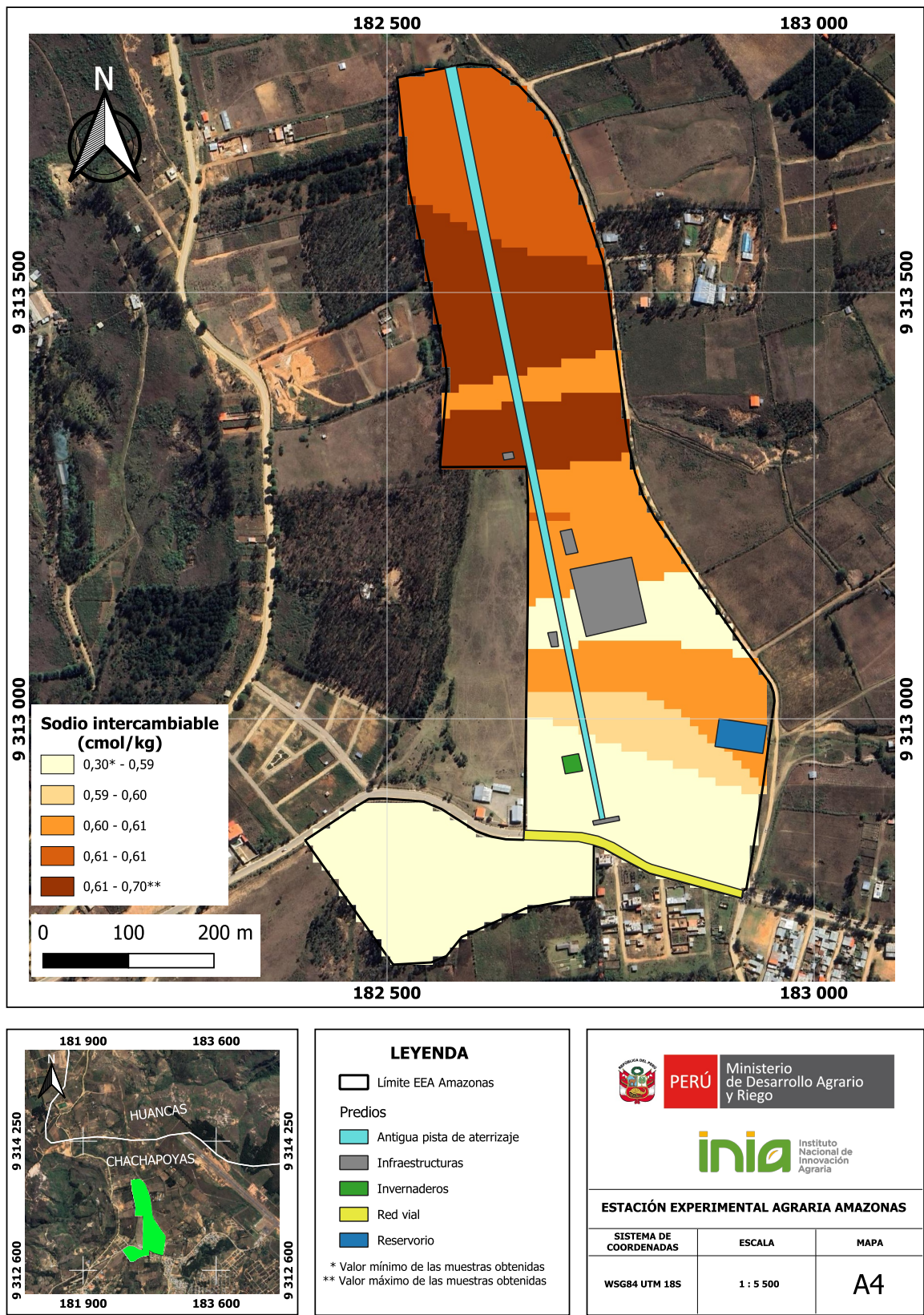


Figura 22. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

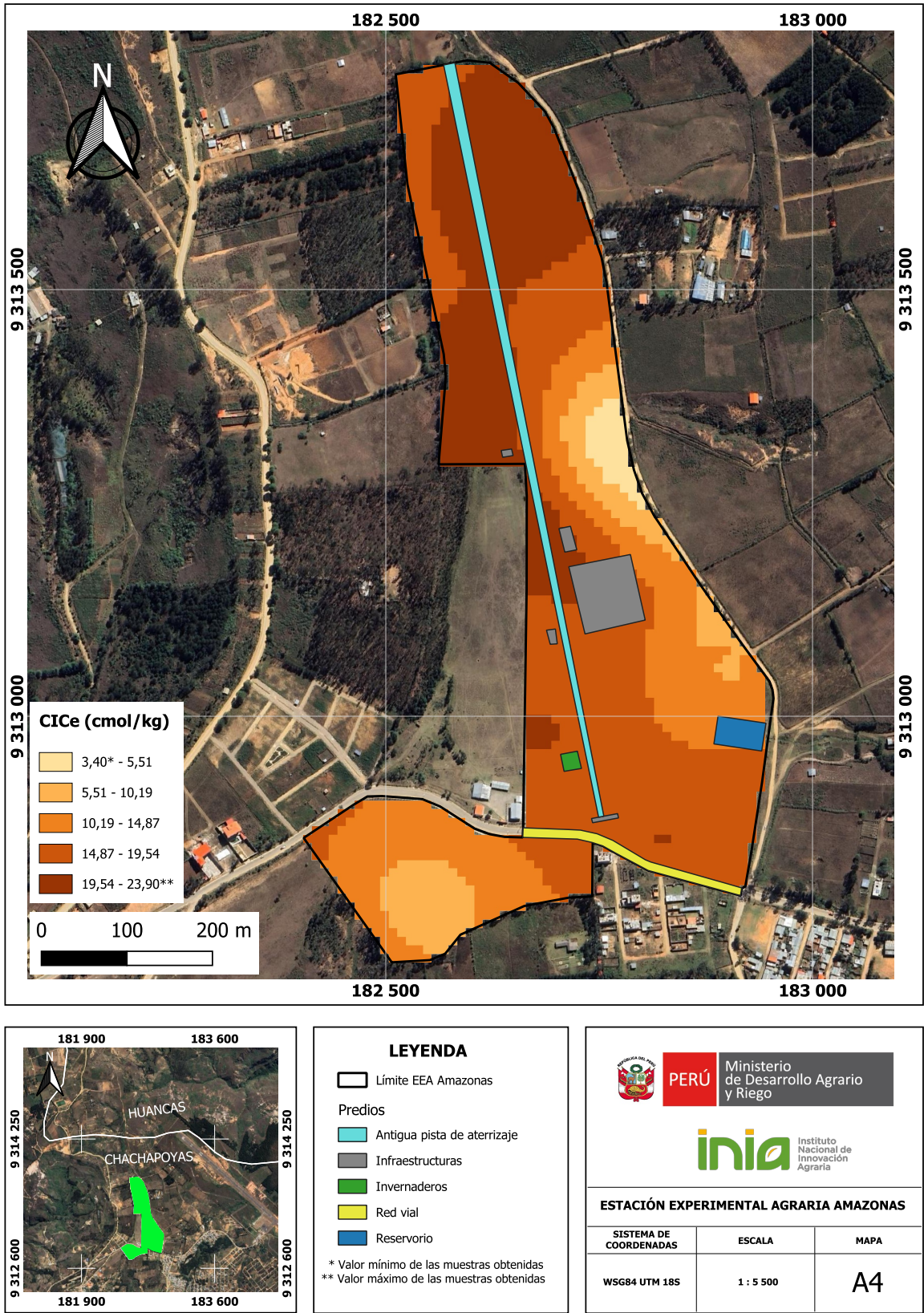


Figura 23. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico específico

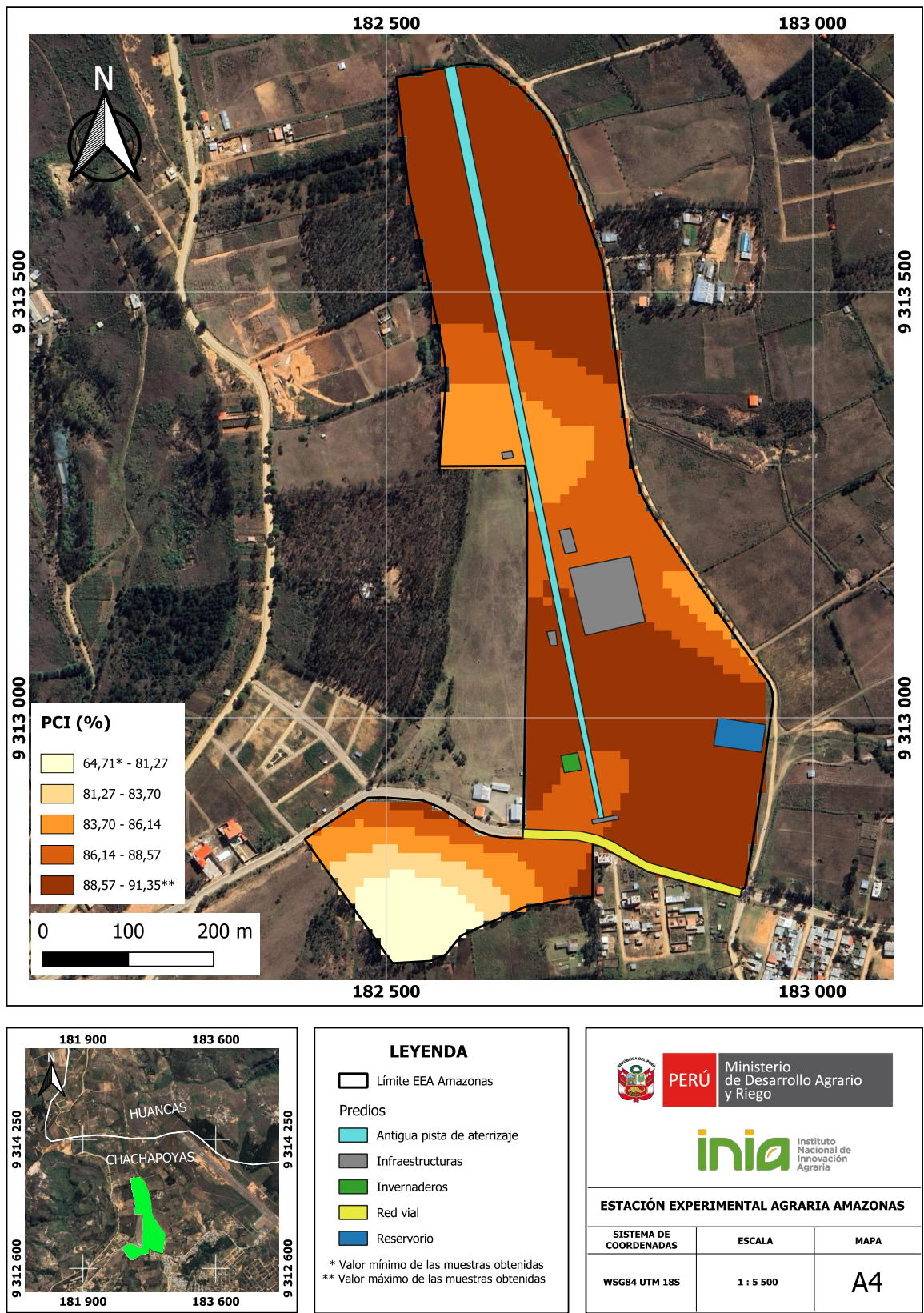


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

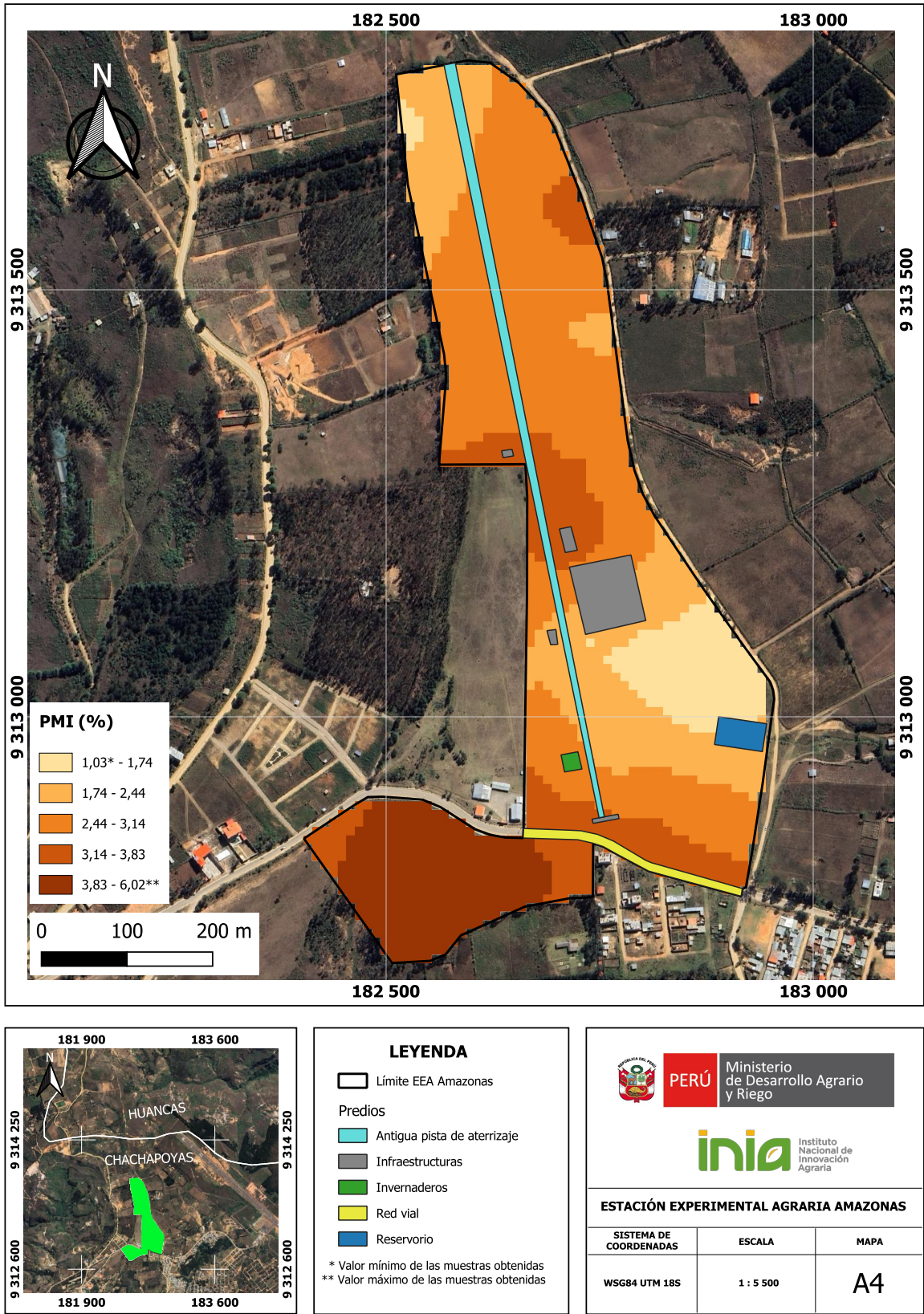


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

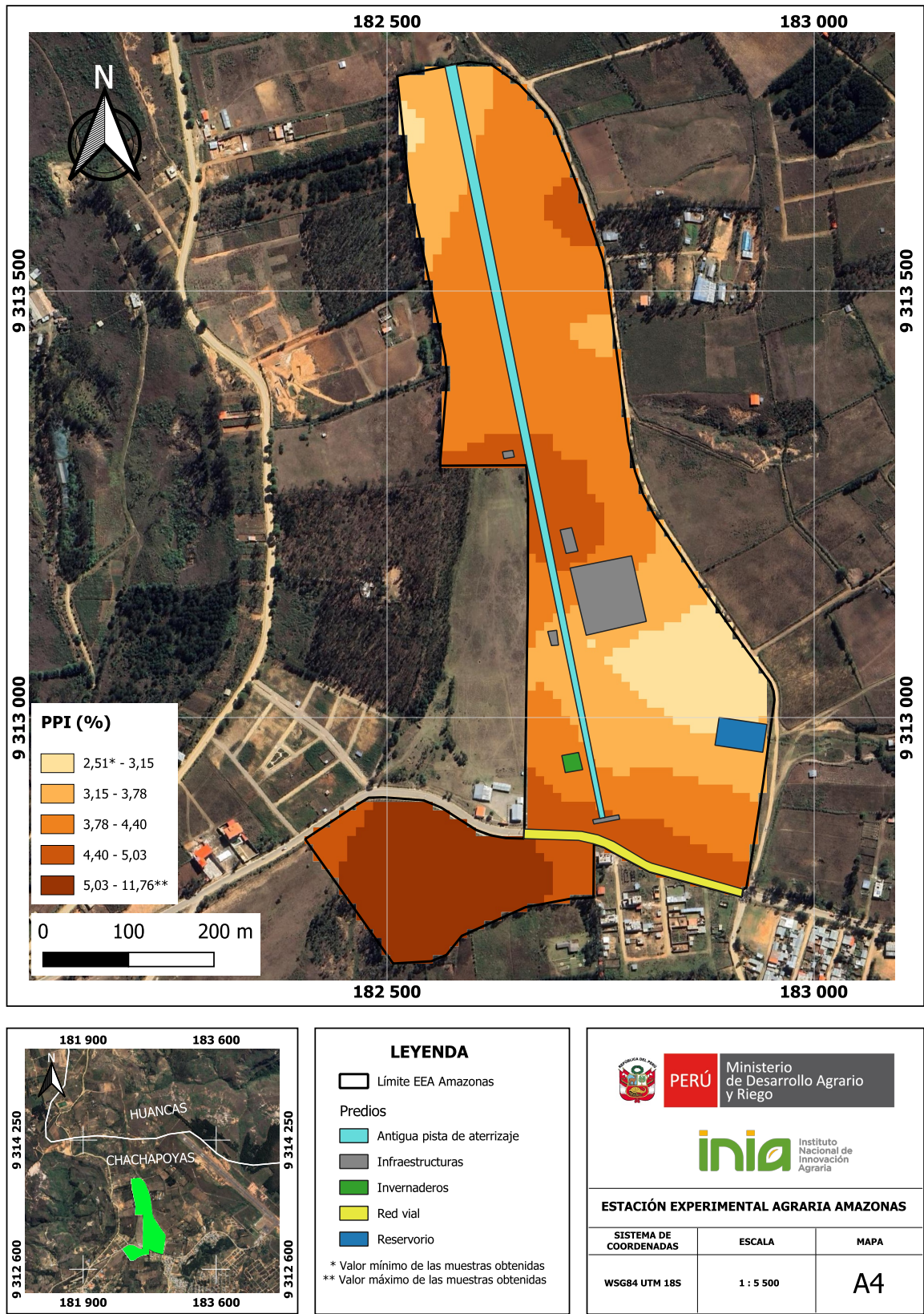


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

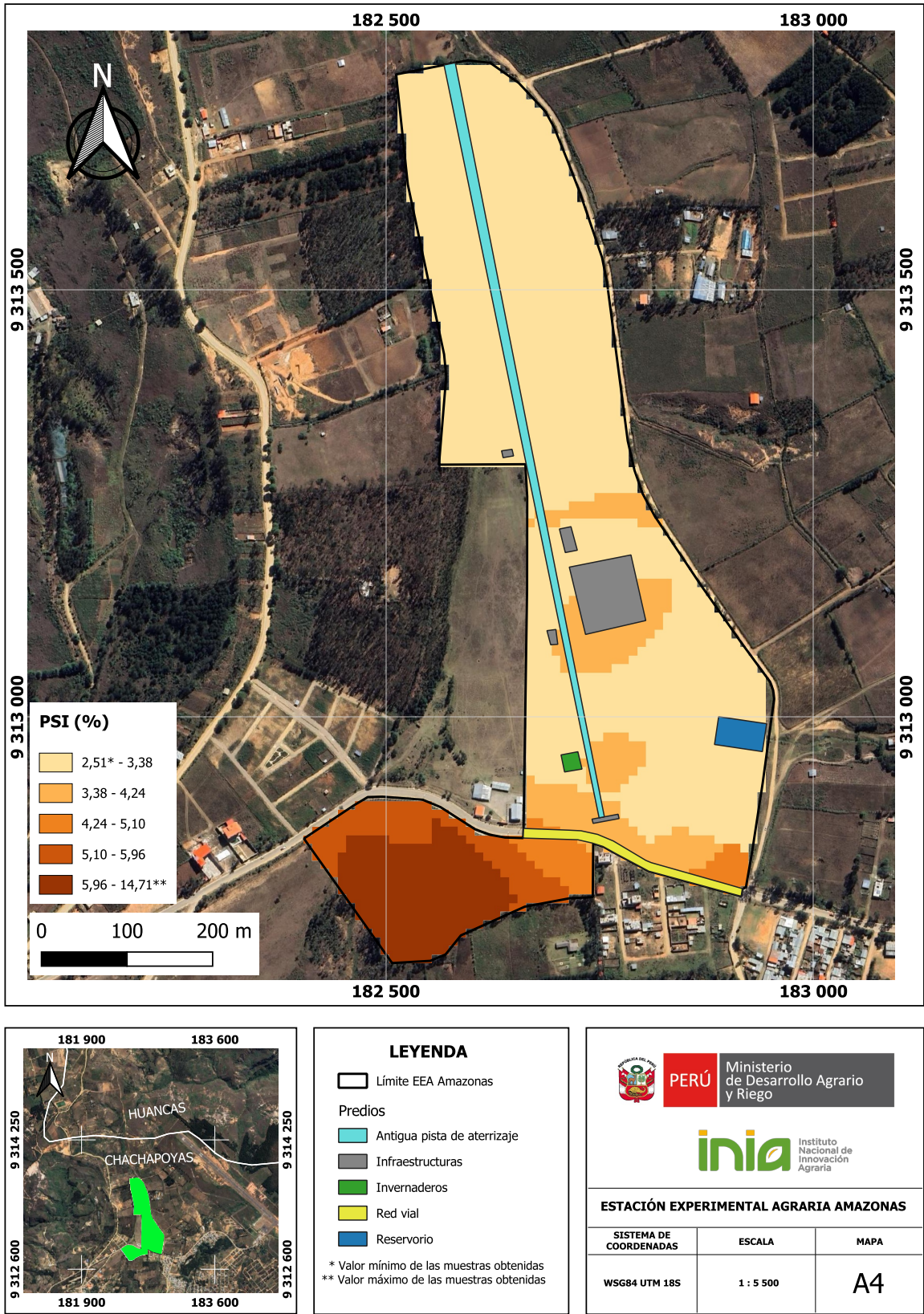


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable



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

4.1 Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de Mg^{2+}

Desde la perspectiva edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo entre los cationes básicos en el complejo de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) es un determinante clave para la nutrición vegetal y la fertilidad química del suelo. La disponibilidad de estos elementos está en función de su contenido en la fase intercambiable (factor cantidad) y la concentración en la solución del suelo (factor intensidad). Asimismo, los coloides de los suelos difieren en su habilidad para mantener la concentración de los elementos en la solución (factor capacidad), debido a su naturaleza y composición química (Havlin et al., 2016; Mengel y Kirkby, 2000).

En los suelos de la EEA Amazonas, el pH ($7,53 \pm 0,58$), la CEe ($0,71 \pm 0,29 \text{ dS m}^{-1}$) y el contenido de $CaCO_3$ ($0,77 \pm 0,49 \%$) no evidenciaron restricciones para la interpretación de la saturación de cationes básicos. En cuanto al porcentaje de saturación de calcio intercambiable (PCI), el promedio obtenido ($87,21 \pm 6,83 \%$) es considerado muy alto, según la clasificación del Instituto Colombiano Agropecuario (1992) resumida en la Tabla 4, lo cual puede favorecer la salud del suelo al mejorar la estabilidad estructural y la actividad biológica.

Tabla 4. Estimativo del porcentaje de saturación de bases en el suelo

Nivel	Calcio		Magnesio		Potasio	
	cmol kg^{-1}	Saturación (%)	cmol kg^{-1}	Saturación (%)	cmol kg^{-1}	Saturación (%)
Alto	>6	>50	>2,5	>25	>0,4	>3
Medio	3-6	30-50	1,5-2,5	15-25	0,2-0,4	2-3
Bajo	<3	<30	<1,5	<15	<0,2	<2

Sin embargo, concentraciones elevadas de Ca^{2+} pueden desplazar, por efecto de acción de masas, a otros cationes esenciales como Mg^{2+} y K^+ de los sitios de intercambio, aumentando su susceptibilidad a la lixiviación. Asimismo, esta condición podría inducir deficiencias de micronutrientes como B, Cl, Fe y Zn, cuya disponibilidad se ve influenciada por las variaciones en el pH del suelo (Parvej et al., 2025). Un indicador de este desbalance es la relación Ca:Mg promedio de 29,86, valor que supera el rango de 10 a 15 considerado alto según Havlin et al. (2016), lo que sugiere una posible deficiencia de magnesio en el suelo.

El magnesio desempeña un papel fundamental en el proceso de fotosíntesis, ya que constituye el átomo central de la molécula de clorofila. Asimismo, participa en la síntesis de proteínas y almidón, procesos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Debido a que el Mg^{2+} es un elemento móvil dentro de la planta, los síntomas de deficiencia se manifiestan inicialmente en las hojas más viejas y posteriormente en las más jóvenes. Entre los principales síntomas se observan clorosis intervenal o amarillamiento entre las nervaduras y, en casos severos, necrosis de los tejidos afectados (Mengel y Kirkby, 2000). En plantas de cacao, se ha reportado que la deficiencia de magnesio provoca clorosis

generalizada, caída de hojas, tallos delgados y escaso desarrollo radicular en plantas jóvenes (Greenwood y Djokoto, 1952). Estos síntomas comprometen de manera significativa el crecimiento, así como el rendimiento y la calidad de las cosechas, situación que también se presenta en cultivos de gran importancia económica como el café.

Para corregir la deficiencia de magnesio en el suelo, se recomienda la aplicación de kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), fertilizante constituido por sulfato de magnesio monohidratado que aporta magnesio (Mg) y azufre (S) en formas altamente solubles y de rápida disponibilidad para las plantas. Su aplicación contribuirá a incrementar los niveles de Mg intercambiable en el suelo.

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Cálculos de requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cacao

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo esférico. El *nugget* (C_0) de 4×10^{-3} y el *sill* ($C_0 + C$) de 414,38 sugiere que la variabilidad es predominantemente estructurada. El rango de autocorrelación espacial es muy bajo ($\text{range} = 261,47 \text{ m}$), y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,17$). Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosfatada debe ser diseñada con base en análisis de suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para la fertilización con fósforo, se debe implementar una estrategia de aplicación localizada y protegida utilizando fertilizantes de alta solubilidad inicial pero baja fijación, como el fosfato monoamónico (MAP) o el fosfato diamónico (DAP), aplicados en bandas o al hoyo de siembra. Finalmente, se recomienda establecer un programa de manejo de la materia orgánica mediante abonos verdes o compost para mejorar la capacidad de intercambio catiónico y la retención de nutrientes a mediano plazo.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de cacao, se adoptará como referencia un nivel crítico de 25 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 2 t ha^{-1} convencional con alta tecnología. El nivel de fósforo en el 25 % de los suelos analizados es menor a $3,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (percentil 25), por lo que se espera respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Para este caso, se tomará como ejemplo este valor de fósforo disponible. En este sentido, el plan de fertilización se formulará considerando los criterios de mantenimiento y construcción de fertilidad, con el objetivo de reponer el fósforo extraído por la cosecha e incrementar las reservas del nutriente en el suelo. El cálculo se realiza siguiendo la metodología descrita por Quispe-Matos et al., 2025.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con $3,2 \text{ mg}$ de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 20 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0,4 \text{ t ha}^{-1}$$

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 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:

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,4 \text{ t ha}^{-1} + 0,14 \text{ t ha}^{-1} = 0,54 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4,7 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4,7 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0,54 \text{ t ha}^{-1} = 2,53 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 30 %.

$$\text{RM de P} = \frac{2,53 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 8,53 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: finalmente 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.

$$\text{RC} = 1,5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 8,43 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 17,43 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 86,77 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP), el cual tiene una riqueza de 46 % de P₂O₅. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de cacao.

4.2.2. Cálculos de requerimiento de fertilización potásica de mantenimiento y construcción para el cacao

Los indicadores geoestadísticos del K disponible del suelo muestran que si hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial ($RMSE = 78,32 \text{ mg kg}^{-1}$ y $R^2 = 0,76$). La media fue de $133,59 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que indica un nivel adecuado a bueno para la mayoría de los cultivos, con un rango que va de $40,80$ a $326,40 \text{ mg kg}^{-1}$. Aunque algunas zonas con valores cercanos al mínimo podrían requerir suplementación potásica, especialmente si se destinan a cultivos con alta demanda de K. Para este caso, se tomará como ejemplo el valor mínimo de potasio disponible registrado ($40,80 \text{ mg kg}^{-1}$) para hacer el cálculo de requerimiento de mantenimiento y construcción. El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al., 2025.

Para el cacao, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 150 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 3 t ha^{-1} . El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de $40,80 \text{ mg}$ de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40% .

Primer paso: calcular el rendimiento con $40,80 \text{ mg}$ de K por kg de suelo.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 3 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1,2 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 0,42 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el incremento de raíces y brotes al rendimiento alcanzado.

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0,42 \text{ t ha}^{-1} + 1,2 \text{ t ha}^{-1} = 1,62 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 20 kg de potasio por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 1,62 \text{ t ha}^{-1} = 32,4 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM). El RM integra el requerimiento de K, 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 K del 70% .

$$\text{RM de K} = \frac{32,4 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0,70} = 46,28 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC). Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 4 kg de K por hectárea para incrementar 1 mg de K por kg del suelo, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 10 mg de K por kg de suelo.

$$RC = 10 \text{ mg de K kg}^{-1} \times \frac{4 \text{ kg de K ha}^{-1}}{1 \text{ mg de K kg}^{-1}} = 40 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Entonces, el plan de fertilización para el primer año se estima de la siguiente manera:

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 46,28 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 86,28 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 172,56 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de cacao.



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., Sánchez, Y., Pizarro, D., y Gómez, C. (2019). *Manejo de los suelos con sistemas silvopastoriles en las regiones de Amazonas y San Martín*. Universidad Nacional Agraria La Molina. https://www.researchgate.net/publication/335541762_Manejo_de_los_suelos_con_sistemas_silvopastoriles_en_las_regiones_de_Amazonas_y_San_Martin
- 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.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bhagwan, P. V., Anjaiah, T., Ravali, C., Devi, M. U., Neelima, T. L., Chary, D. S., & Chatterjee, S. (2025). Delineating soil fertility management zones using geostatistics and fuzzy clustering in semi-arid maize systems in India. *Environmental Monitoring And Assessment*, 197(11), 1230. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14608-z>
- 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/>
- 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). <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/agj2.20787>
- 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>
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2010). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658-1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- 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>
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1a ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- 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. <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. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- Greenwood, M., y Djokoto, R. K. (1952). Symptoms of Mineral Deficiency in Cacao. *Journal Of Horticultural Science*, 27(4), 223-236. <https://doi.org/10.1080/00221589.1952.11513760>
- 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://doi.org/10.4141/cjss58-014>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Colombiano Agropecuario (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación* (Manual de Asistencia Técnica No. 25).
- 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*. <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 Argiudoles 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>
- Mengel, K., y Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4^{ta} ed.). International Potash Institute.
- 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 (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). ASA Special Publications. <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>
- Parvej, M. R., Keay, J., y Lee, R. (2025) *When More Is Less: How Excess Nutrients Can Cause Deficiencies in Crops*. Extension University of Missouri. <https://extension.missouri.edu/publications/g9069>
- 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>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-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.
- Ruiz Camacho, W., Suarez Rivadeneira, J. E., Colmenares Mayanga, W., Delgado Soto, J. A., Rubio Cueva, L., y Díaz Ruiz, A. (2026). Química de Suelos en la Selva Peruana. Influencia de la Capacidad de Intercambio Catiónico sobre la Fertilidad y Productividad. Ediciones Clío. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18486858>

- 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>
- 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>

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



- 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 Chinch - Ica







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

ISBN: 978-9972-44-271-1



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru