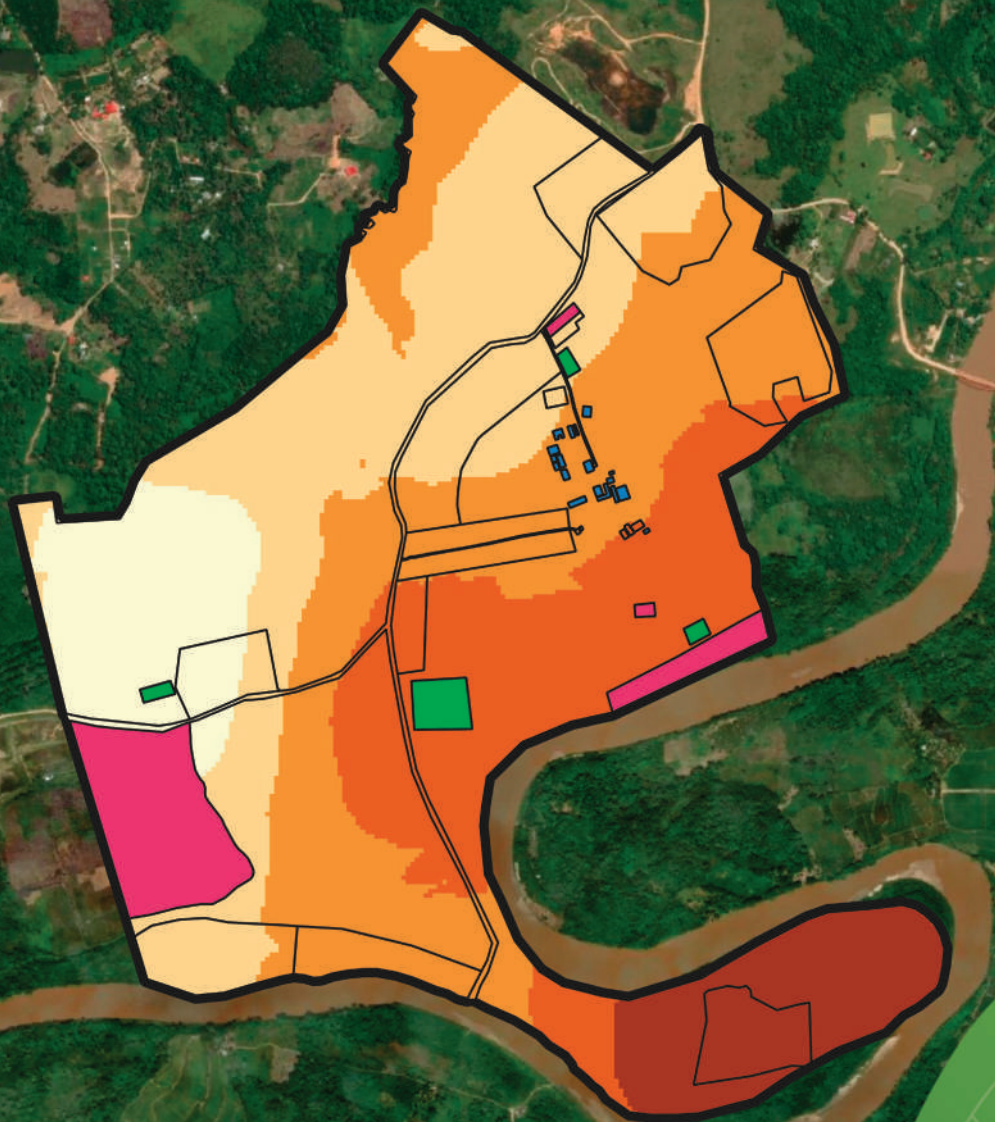


# Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Ramón



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 San Ramón**



## VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA SAN RAMÓN

### 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:

978-9972-44-248-3

#### Editado por:

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 240-2400

[www.gob.pe/inia](http://www.gob.pe/inia)

#### Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:

Janet Flores / Teléfono: 964173509 / Correo electrónico: [comite\\_publicaciones@inia.gob.pe](mailto: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° 2026-01778

**Autores:** Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Evelyn I. Vicente-Flores, Albert E. Fernandez-Puquio, Henry Diaz-Chuquizuta, 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

<b>Presentación</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Principios fundamentales del análisis de suelos</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos</b>	<b>11</b>
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
<b>2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo</b>	<b>23</b>
<b>3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA San Ramón</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Ubicación de la EEA San Ramón</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Muestreo estratificado del suelo</b>	<b>26</b>
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
<b>3.3. Análisis de suelos</b>	<b>29</b>
<b>3.4. Resultados de los análisis de suelos</b>	<b>30</b>
<b>3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo</b>	<b>32</b>
<b>3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran</b>	<b>33</b>
<b>3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos</b>	<b>34</b>
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
<b>3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo</b>	<b>37</b>
<b>4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA San Ramón</b>	<b>53</b>
<b>4.1. Índice de saturación de bases catiónicas</b>	<b>53</b>
4.1.1. Zonificación de encalado y balance catiónico para optimizar la fertilidad de los suelos	53
<b>4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles</b>	<b>61</b>
4.2.1. Zonificación de niveles deficientes de P-Bray del suelo y dosificación de la fertilización fosforada para cacao	61
<b>5. Referencias bibliográficas</b>	<b>67</b>



# 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, plántones 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.

La fertilidad del suelo varía espacialmente y esta variación afecta tanto la productividad agrícola como la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo. Las evaluaciones convencionales que emplean promedios o datos puntuales no describen esta heterogeneidad, por lo que la aplicación de la geoestadística y de los sistemas de información geográfica (SIG) resulta fundamental para analizar y gestionar la fertilidad de manera precisa. Estas herramientas permiten identificar zonas con comportamientos edáficos diferenciados y optimizar las prácticas de manejo agronómico según las condiciones específicas de cada sitio. Asimismo, facilitan la planificación de estrategias de fertilización más eficientes, contribuyendo a mejorar la rentabilidad y reducir impactos ambientales asociados al uso indiscriminado de fertilizantes.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA San Ramón”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico preciso del estado del suelo, para facilitar la toma de decisiones sobre la fertilización, el manejo del cultivo y el uso del terreno, favoreciendo una producción más eficiente y sostenible.

**M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal**

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



# 1. Introducción

El suelo constituye la base fundamental de la producción agrícola, proporciona el soporte físico y los nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos (Labrador, 2008). Su adecuada gestión permite sostener la productividad, conservar los recursos naturales y garantizar la seguridad alimentaria de las poblaciones (Burbano-Orjuela, 2016). Sin embargo, la fertilidad del suelo representa un factor limitante en muchas regiones del país, dado que condiciona la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de respuesta de los cultivos a las prácticas de manejo.

En la Amazonía, uno de los principales problemas está asociado al uso de esquemas de fertilización generalizados, sin considerar la variabilidad espacial de los suelos. Este tipo de manejo conduce a la aplicación ineficiente de fertilizantes, incrementa las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía, y acelera procesos de degradación del suelo, como la acidificación, disminución de la materia orgánica y reducción de la capacidad productiva a mediano plazo.

La Estación Experimental Agraria (EEA) San Ramón se localiza en la región Selva Baja u Omagua, departamento de Loreto, a una altitud aproximada de 141 m s. n. m., y presenta un régimen climático caracterizado por precipitaciones anuales de hasta 2095 mm y temperaturas medias que oscilan entre 24 y 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025). Desde el punto de vista edafológico, en la estación se distinguen dos tipos principales de suelos: al oeste, Cambisol dístrico y Acrisol háplico, y al noreste, Fluvisol éútrico y Gleysol éútrico, formados a partir de materiales aluviales recientes y antiguos (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996).

Las condiciones climáticas y edáficas de la zona imponen importantes limitaciones productivas, entre las que destacan la acidez del suelo, la lixiviación de nutrientes y la variabilidad en la disponibilidad de fósforo y bases de cambio. Estas condiciones reducen la eficiencia en el uso de fertilizantes y, en consecuencia, limitan el rendimiento de los cultivos. A ello se suma que el uso agropecuario predominante, con énfasis en frijol caupí, arroz, especies forestales y producción bovina, enfrenta desafíos asociados al manejo inadecuado de la fertilización y a la presión ejercida sobre suelos con distinta aptitud productiva.

Frente a este escenario, es fundamental disponer de información detallada y actualizada sobre la fertilidad del suelo y su variación espacial en la EEA San Ramón. El análisis de esta variabilidad constituye una herramienta clave para identificar zonas con potencial productivo diferenciado y mejorar la eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Reza et al., 2017). Asimismo, esta información permite orientar la investigación y la asistencia técnica hacia la implementación de prácticas de manejo más sostenibles en la Amazonía baja.

El presente documento tiene como objetivo brindar lineamientos técnicos y herramientas prácticas para la evaluación de la fertilidad del suelo y su variación espacial en la Estación Experimental Agraria San Ramón, para apoyar a profesionales del sector agrario e investigadores en la toma de decisiones para el manejo eficiente del suelo. Asimismo, busca contribuir a la planificación agrícola y al fortalecimiento de sistemas productivos sostenibles, mediante el diagnóstico de las principales limitantes edáficas, la identificación de áreas con diferente aptitud productiva y la formulación de recomendaciones de manejo orientadas a optimizar el uso de insumos agrícolas, mejorar la productividad y conservar el recurso suelo en la estación.



## 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).

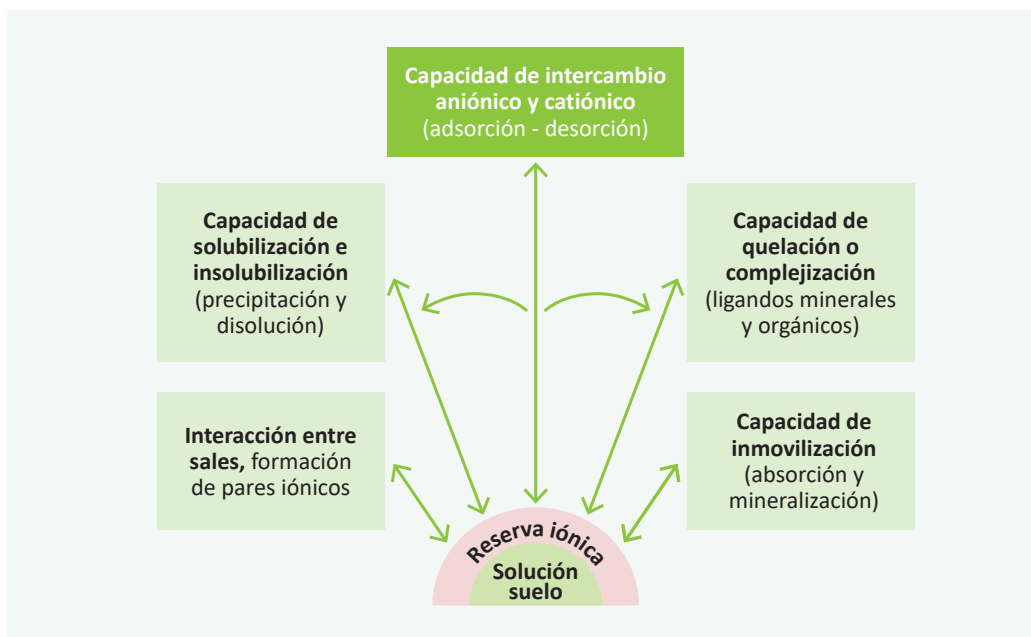
#### 2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

##### 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 ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y, en algunos casos, sodio ( $\text{Na}^+$ ), 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 San Ramón del INIA.

##### b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de BCSR tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) 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).

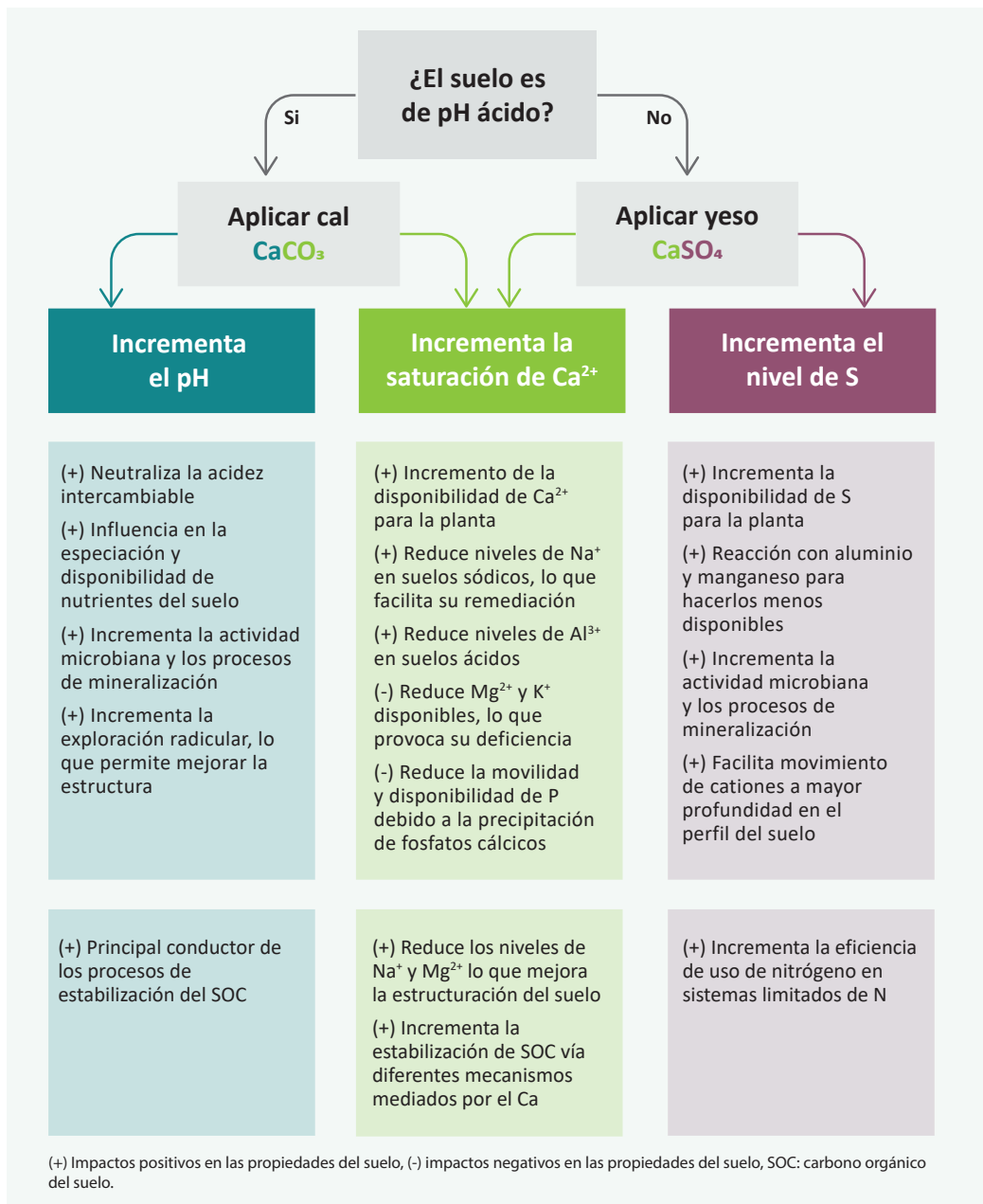


**Figura 1.** Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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  $\text{Ca}^{2+}$ , 10-15 % de  $\text{Mg}^{2+}$ , 3-7 % de  $\text{K}^+$  y menos del 5 % de  $\text{Na}^+$ , mientras que el hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) 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 iónico (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  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Na}^+$ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y son las principales herramientas para aumentar la saturación de  $\text{Ca}^{2+}$  y reducir la de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ . 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  $\text{Ca}^{2+}$  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.

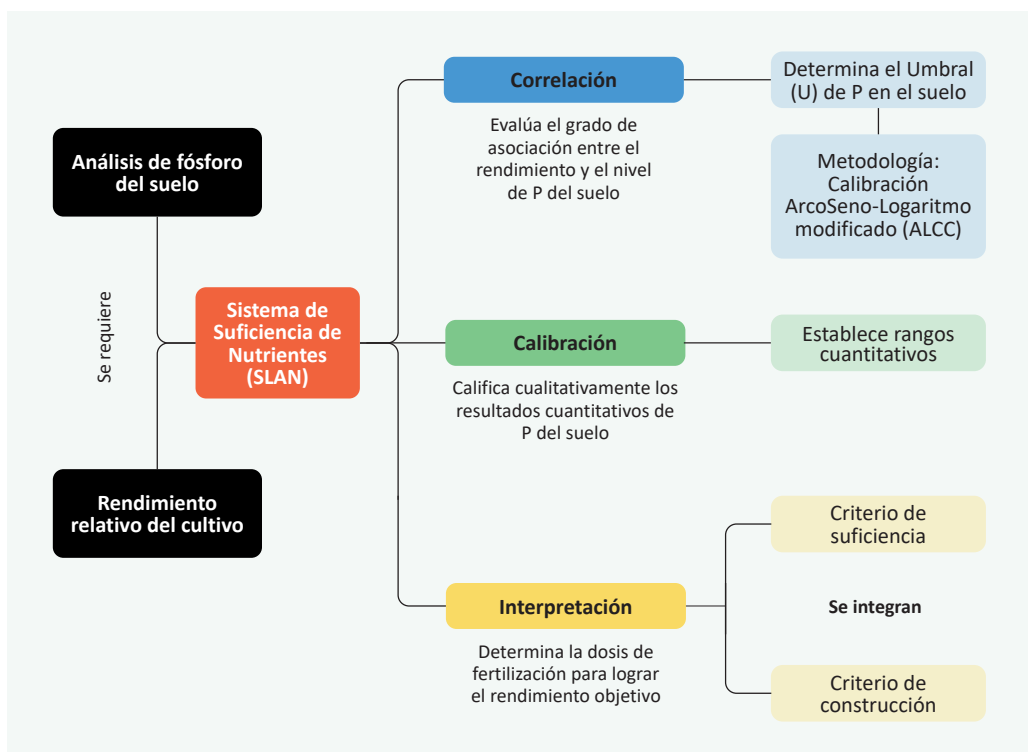


**Figura 2.** Criterios de uso de la cal y el yeso y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

## 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, tal como se señala 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), 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 la fertilidad, es necesario conocer previamente la eficiencia del uso de nutrientes y la necesidad de construcción de la 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 nutriente, 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 frijol caupí, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

### Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de frijol caupí, y se obtuvo 12 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 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2.5 t ha<sup>-1</sup>. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 12 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

**Primer paso:** calcular el rendimiento alcanzado con 12 mg de P-Bray por kg de suelo utilizando la fórmula 2:

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 2.5 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 2 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (12 mg kg<sup>-1</sup>) está por debajo del umbral crítico (15 mg kg<sup>-1</sup>), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 2 t ha<sup>-1</sup> en lugar de 2.5 t ha<sup>-1</sup>.

**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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 2 \text{ t ha}^{-1} = 0.7 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 2 t ha<sup>-1</sup> de producción, el cultivo genera 0.7 t ha<sup>-1</sup> 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.7 \text{ t ha}^{-1} + 2 \text{ t ha}^{-1} = 2.7 \text{ t ha}^{-1}$$

**Cuarto paso:** calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 8 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 8 \text{ kg de P t}^{-1} \times 2.7 \text{ t ha}^{-1} = 21.6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 21.6 kg de P por ha para alcanzar un rendimiento objetivo de 2.7 t ha<sup>-1</sup>, el cual está conformado por 0.7 t ha<sup>-1</sup> de raíces y brotes nuevos, y 2 t ha<sup>-1</sup> de producción.

### c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis del suelo indica un contenido medio-bajo de nutriente. 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 nutriente 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 y 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 con el cultivo de frijol caupí 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 frijol caupí, y se obtuvo 8 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 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2.5 t ha<sup>-1</sup>. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 8 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

**Primer paso:** calcular el rendimiento alcanzado con 8 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 2.5 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1.25 \text{ t ha}^{-1}$$

**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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 1.25 \text{ t ha}^{-1} = 0.44 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.44 \text{ t ha}^{-1} + 1.25 \text{ t ha}^{-1} = 1.69 \text{ t ha}^{-1}$$

**Cuarto paso:** calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 8 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 8 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1.69 \text{ t ha}^{-1} = 13.52 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 %.

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

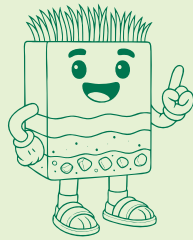
$$\text{RM de P} = \frac{13.52 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 45.06 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de frijol caupí es 45.06 kg por hectárea.

## Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de frijol caupí, y se obtuvo 5 mg de P-Bray 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 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 2.5 t ha<sup>-1</sup>. 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 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 5 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 2.5 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0.75 \text{ t ha}^{-1}$$

**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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 0.75 \text{ t ha}^{-1} = 0.26 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.26 \text{ t ha}^{-1} + 0.75 \text{ t ha}^{-1} = 1.01 \text{ t ha}^{-1}$$

**Cuarto paso:** calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 8 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 8 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1.01 \text{ t ha}^{-1} = 8.08 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8.08 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 40.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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.

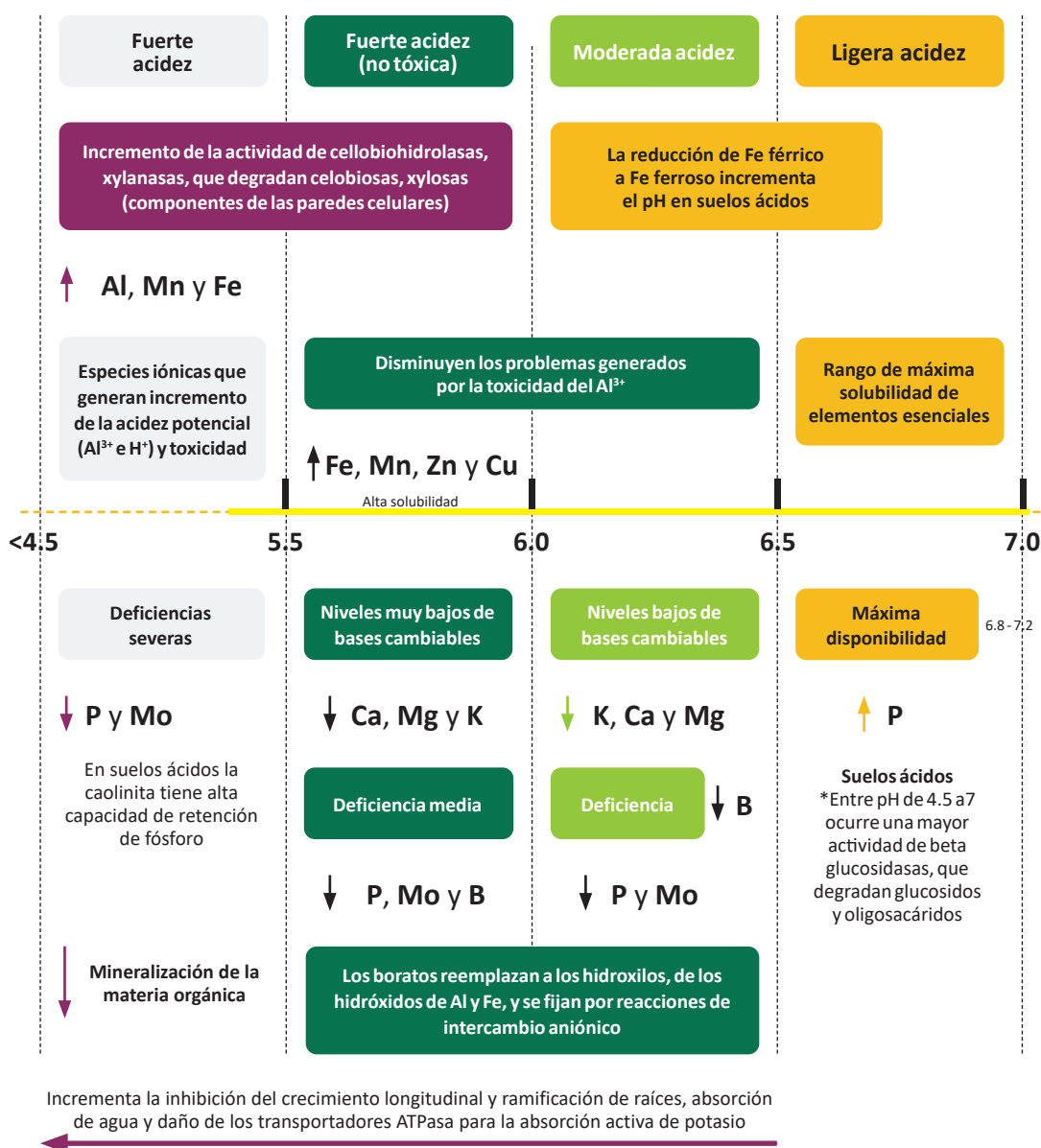
$$\text{Dosis de fertilización} = RM + RC \quad \dots(8)$$

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 40.40 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 49.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de frijol caupí es 49.40 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 Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024), y Alam et al. (1999).



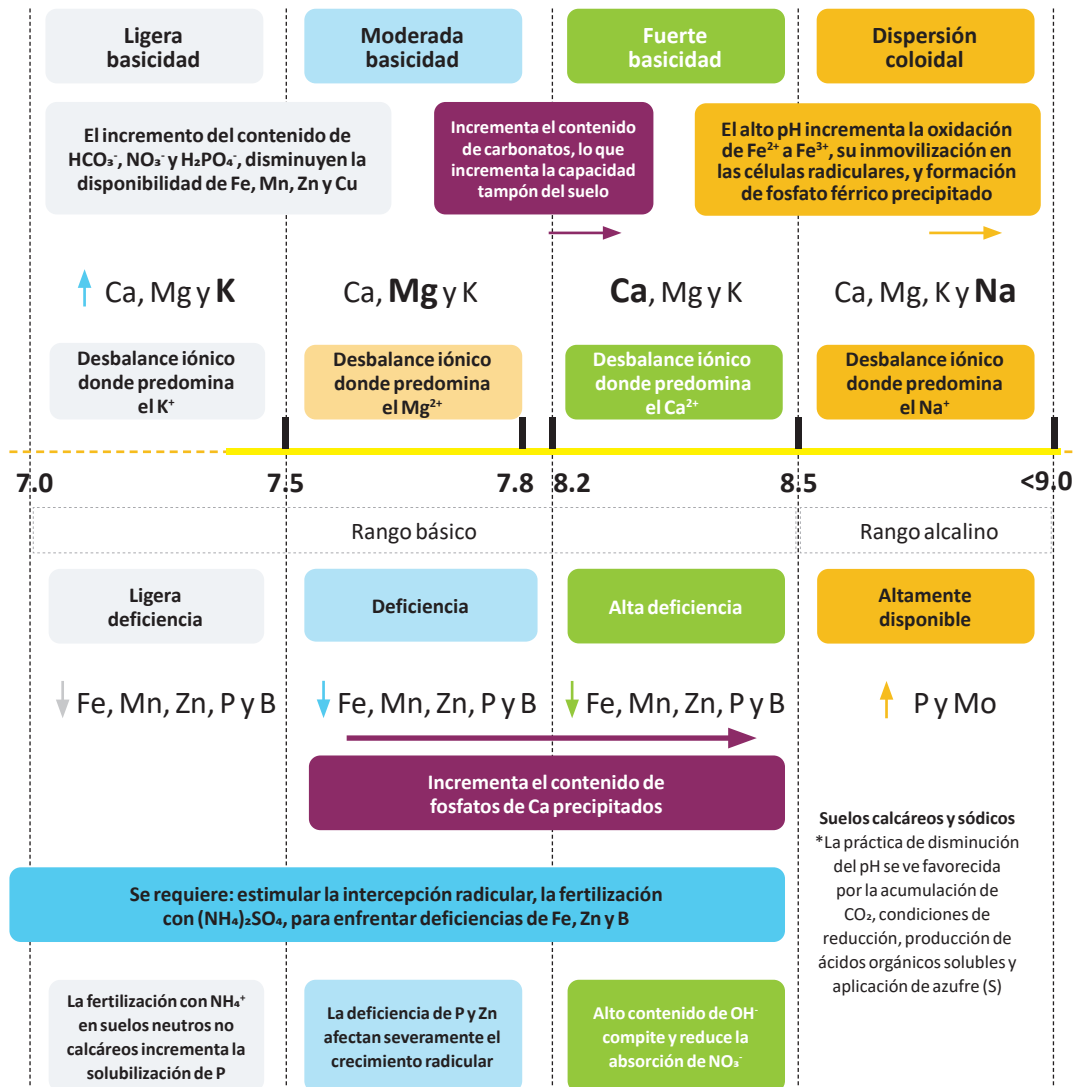


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

## 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 de la EEA San Ramón

### 3.1. Ubicación de la EEA San Ramón

La EEA San Ramón presenta dos tipos de suelos, la parte oeste es de tipo Cambisol dístico – Acrisol háplico y la parte noreste es de tipo Fluvisol éutrico – Gleysol éutrico, originados a partir de materiales aluviales recientes y antiguos (INRENA, 1996). Cuenta con un centro experimental y un predio urbano con una extensión total de 229.04 ha, siendo los cultivos priorizados: maíz amarillo duro (*Zea mays* L.), frijol caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) y arroz (*Oryza sativa*). Además, en esta estación se trabaja con especies forestales y bovinos.

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Loreto. La EEA San Ramón se encuentra en el distrito de Yurimaguas, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto (Figura 5), en la región Selva Baja u Omagua a 141 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 2095 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 24 a 32 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

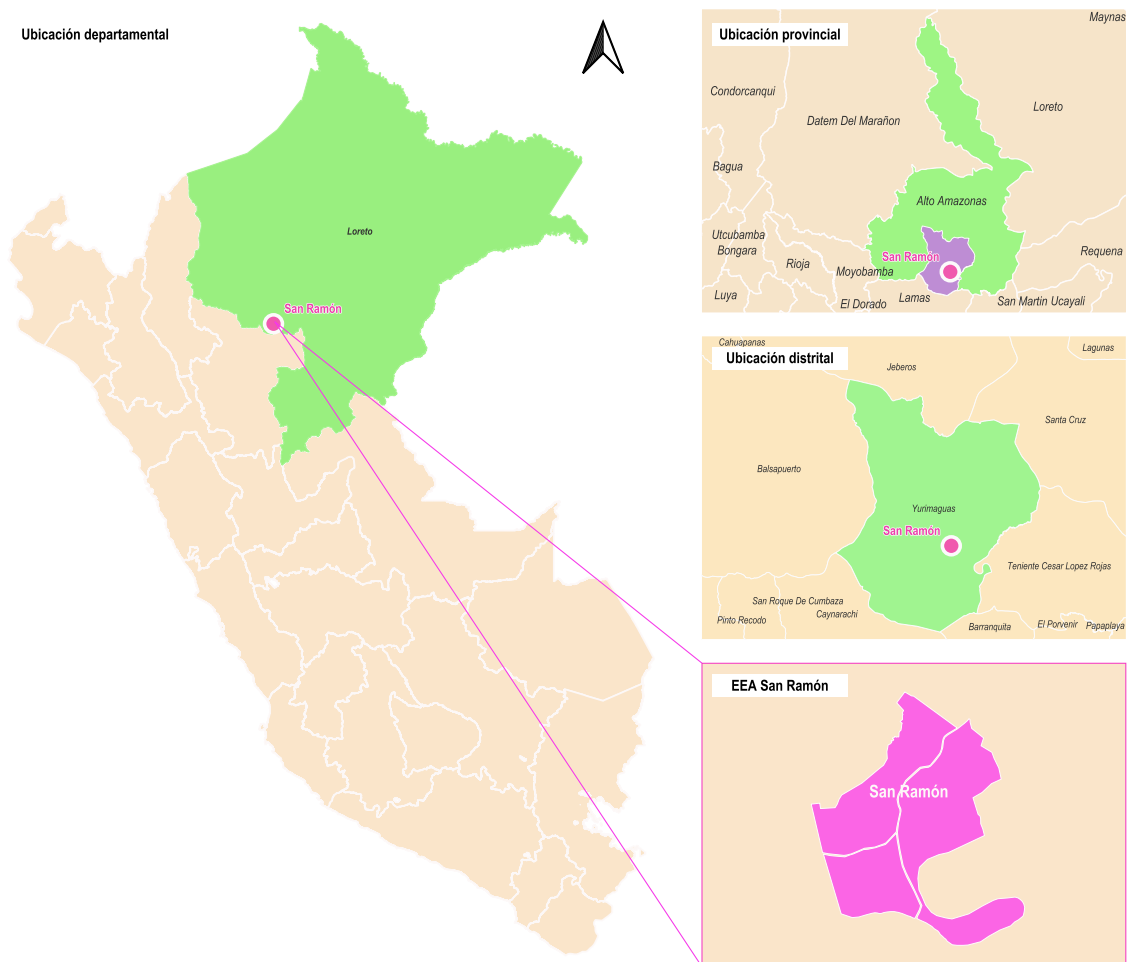


Figura 5. Ubicación de la EEA San Ramón

### 3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

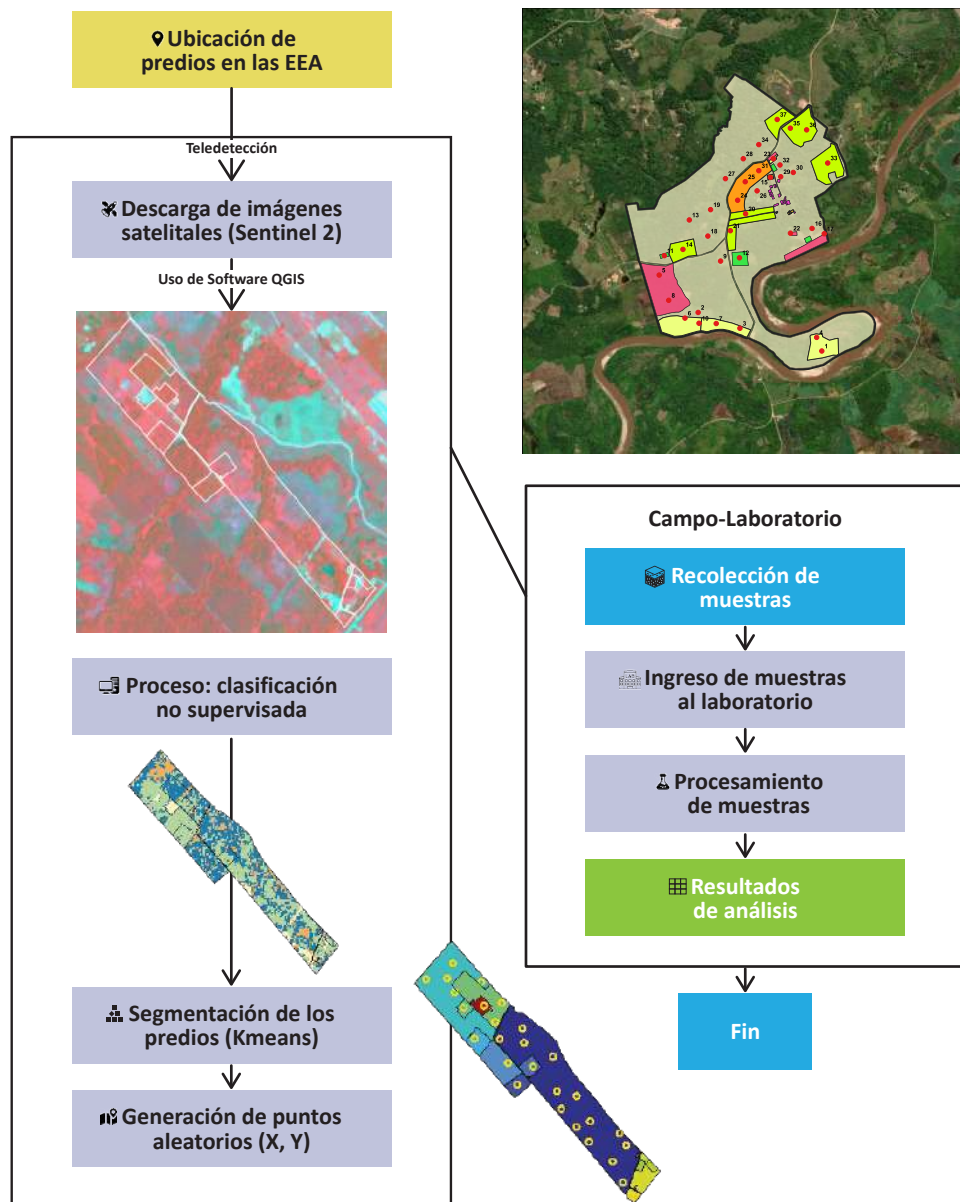


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

### 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* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 37 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

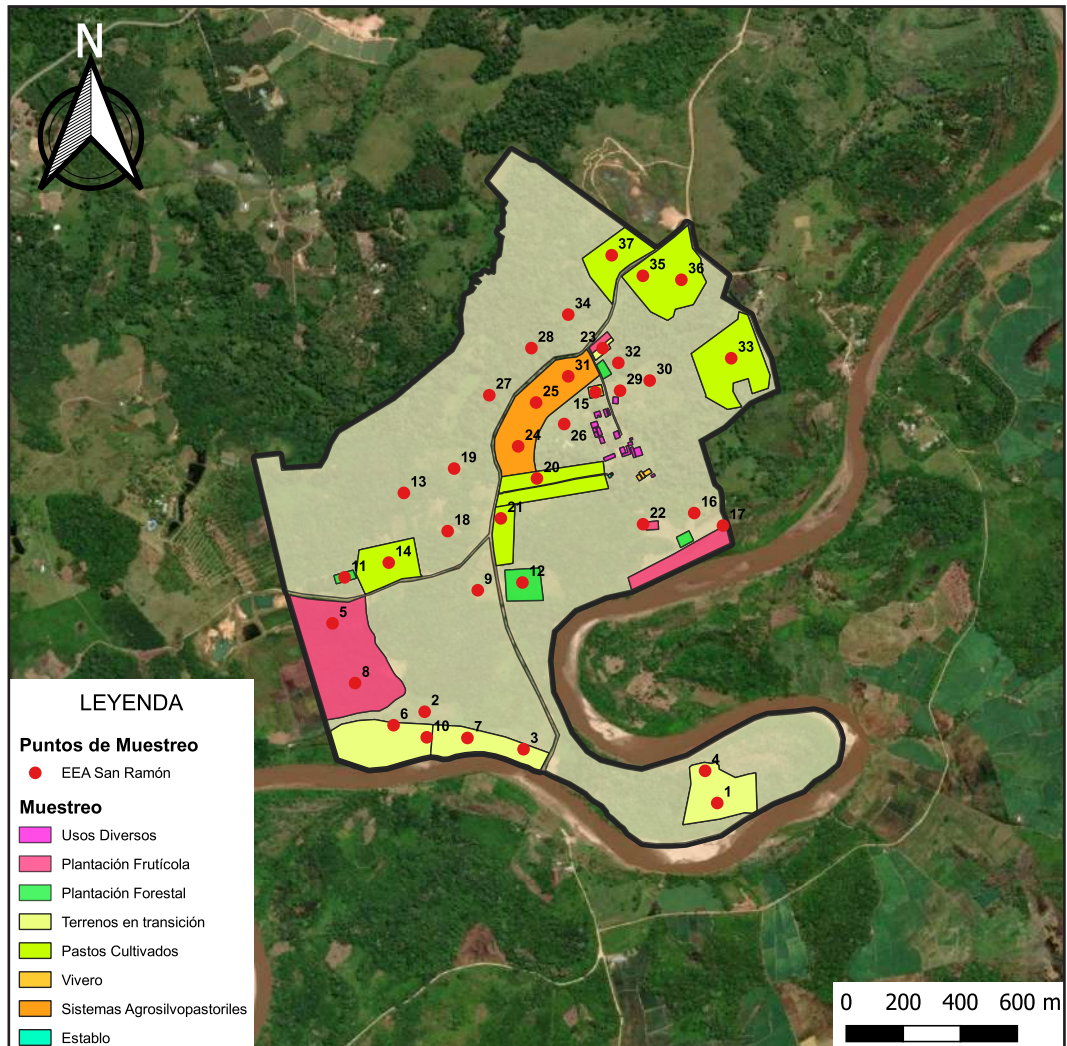


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA San Ramón

### 3.2.2. Muestreo del suelo en los puntos identificados

Luego de identificar las coordenadas de los 37 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. Entre una y la otra colocar la cartilla de identificación.



**Figura 8.** Proceso del muestreo de suelo. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra (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 Foliare de la EEA El Porvenir 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 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, correspondiente a la EEA San Ramón, muestran que los suelos presentan, en promedio, una textura franco-arenosa (50.74 % arena, 27.58 % arcilla, 21.68 % limo), con una variabilidad moderada (CV entre 36-50 %) y distribución cercana a la simetría (*Skewness* entre -0.26 y 1.63). Esto indica cierta heterogeneidad en la composición granulométrica, lo que puede afectar la identificación de zonas con diferentes grados de retención de agua y nutrientes.

El pH del suelo es fuertemente ácido ( $4.96 \pm 0.54$ , CV = 10.86 %), con distribución asimétrica positiva (*Skewness* = 1.54), lo cual es característico de suelos lixiviados y con baja saturación de bases. Este nivel de acidez puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales y aumentar la toxicidad de elementos como el aluminio. En efecto, se observa una alta concentración de aluminio intercambiable ( $2.99 \text{ cmol kg}^{-1}$ , CV = 77.13 %), con valores extremos de hasta  $12.10 \text{ cmol kg}^{-1}$ , lo que representa un factor limitante importante para el desarrollo radicular de los cultivos.

El contenido de materia orgánica (MO) es extremadamente bajo ( $0.35 \% \pm 0.92 \%$ , CV = 264.93 %), al igual que el nitrógeno total ( $0.02 \%$ , CV = 275.42 %), ambos con fuerte asimetría positiva, lo que evidencia una marcada pobreza en materia orgánica y nutrientes, posiblemente asociada a un uso intensivo del suelo sin prácticas adecuadas de conservación del suelo.

La conductividad eléctrica (CE =  $0.26 \text{ dS m}^{-1} \pm 0.11$ ) es baja en promedio, aunque presenta una alta variabilidad (CV > 40 %) y valores puntuales de hasta  $0.80 \text{ dS m}^{-1}$ , lo cual podría reflejar microambientes con mayor acumulación de sales, aunque sin indicar salinidad generalizada.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de fósforo disponible (P-Bray =  $6.91 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y potasio ( $37.34 \text{ mg kg}^{-1}$ ) son bajos, con alta variabilidad (CV > 85 %), lo que sugiere presencia de *hotspots* posiblemente originados por aplicaciones localizadas de fertilizantes, pero muy pobres en capacidad de almacenamiento de P y K en todo el espacio analizado.

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) es baja a moderada ( $5.83 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), con alta dispersión (CV = 72.45 %), y dominancia del aluminio como catión intercambiable. El calcio y el magnesio presentan valores bajos ( $1.93$  y  $0.81 \text{ cmol kg}^{-1}$ , respectivamente), y el potasio intercambiable es marginal ( $0.10 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), lo que limita la reserva de nutrientes disponibles para las plantas. Esto resalta en los porcentajes de participación catiónica, donde el aluminio (PAI = 61.08 %) evidencia un perfil claramente ácido.

Dada esta condición fuertemente ácida y baja fertilidad química, se recomienda la aplicación de enmiendas como cal agrícola para elevar el pH, reducir la toxicidad por aluminio y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Además, sería prioritario implementar prácticas de manejo que promuevan el incremento de la materia orgánica, como cultivos de cobertura, incorporación de residuos orgánicos y rotaciones adecuadas.

En resumen, los suelos de la EEA San Ramón se caracterizan por una textura moderadamente variable, una acidez elevada con predominio de aluminio en el complejo de intercambio, y una fertilidad química muy baja y heterogénea, lo que demanda un manejo agronómico correctivo y adaptado a las condiciones locales.

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la EEA San Ramón

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Skewness	Mínimo	Mediana	Máximo
Arena	%	50.74	18.33	36.13	-0.26	12.87	52.73	83.38
Limo	%	21.68	10.86	50.08	1.63	7.90	18.48	56.48
Arcilla	%	27.58	10.36	37.54	-0.05	8.50	27.93	48.43
CE	dS m <sup>-1</sup>	0.26	0.11	41.16	3.21	0.16	0.24	0.80
pH	und	4.96	0.54	10.86	1.54	4.31	4.82	6.85
MO	%	0.35	0.92	264.93	4.83	0.00	0.07	5.52
N Total	%	0.02	0.05	275.42	4.76	0.00	0.00	0.28
P disp.	mg kg <sup>-1</sup>	6.91	7.33	106.03	3.77	1.40	4.82	44.52
K disp.	mg kg <sup>-1</sup>	37.34	31.84	85.28	1.43	3.01	24.06	146.37
Ca <sup>2+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	1.93	2.48	128.19	1.00	0.06	0.61	7.34
Mg <sup>2+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.81	0.85	104.65	1.23	0.26	0.34	2.56
K <sup>+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	0.10	0.08	84.36	1.42	0.01	0.06	0.37
Al <sup>3+</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	2.99	2.31	77.13	1.74	0.10	2.50	12.10
CICe	cmol kg <sup>-1</sup>	5.83	4.22	72.45	1.20	1.49	4.16	18.66
PCI	%	24.37	22.08	90.59	0.79	1.46	22.00	70.89
PMI	%	12.88	6.05	47.00	1.02	3.78	11.93	28.67
PPI	%	1.67	0.80	47.84	0.86	0.40	1.46	3.70
PAI	%	61.08	26.66	43.65	-0.97	1.12	65.59	89.93
RC	t ha <sup>-1</sup>	2.17	1.74	80.17	1.74	0.00	1.80	9.06

CE: 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, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de fósforo intercambiable, PAI: porcentaje de aluminio intercambiable, RC: requerimiento de cal, CV: coeficiente de variación y SD: desviación estándar.

### 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 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.

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

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

- 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).

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

La caracterización geoestadística de los suelos de la EEA San Ramón permitió identificar una marcada estructura espacial en múltiples propiedades edáficas, particularmente aquellas asociadas a la fertilidad química (Tabla 3). Variables como el K disponible ( $R^2 = 0.90$ ), P disponible ( $R^2 = 0.90$ ),  $Ca^{2+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.85$ ),  $Mg^{2+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.84$ ) y  $K^+$  intercambiable ( $R^2 = 0.85$ ), presentaron una dependencia espacial bien definida, mayoritariamente modelada mediante funciones gaussianas o lineales hasta el umbral. Estas condiciones indican alta predictibilidad espacial, clave para diseñar estrategias de fertilización sitio-específicas que maximicen la eficiencia en el uso de nutrientes.

Las propiedades texturales como la arena ( $R^2 = 0.90$ ) y el limo ( $R^2 = 0.79$ ) también evidenciaron estructuras espaciales consistentes, lo que facilita la delimitación de unidades edáficas funcionales. En cuanto al pH ( $R^2 = 0.43$ ) y CE ( $R^2 = 0.57$ ), ambos mostraron dependencia espacial moderada, permitiendo su representación cartográfica con precisión aceptable. El contenido de  $Al^{3+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.93$ ) destaca por su elevada organización espacial, resultando esencial en suelos ácidos donde la toxicidad por  $Al^{3+}$  limita el crecimiento radicular. La MO ( $R^2 = 0.31$ ), pese a su elevada variabilidad absoluta, conserva suficiente dependencia espacial como para orientar intervenciones agronómicas específicas.

En conjunto, los resultados evidencian que los macronutrientes disponibles, los principales cationes del complejo de intercambio y factores limitantes como el aluminio intercambiable, constituyen las variables con mayor grado de ajuste espacial para la zonificación edáfica. Su clara dependencia espacial y alto grado de predictibilidad validan el uso de herramientas geoestadísticas para el diseño de unidades de manejo diferenciado.

**Tabla 3.** Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo de la EEA San Ramón

Variable	Modelo	Nugget ( $C_0$ )	Sill ( $C_0+C$ )	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R <sup>2</sup>
Arena	<i>Linear to Sill</i>	213.436	325.295	739.569	764.754	0.895
Limo	<i>Linear to Sill</i>	59.475	102.570	565.996	193.714	0.791
Arcilla	<i>Linear to Sill</i>	54.523	65.638	747.979	672.116	0.085
pH	<i>Spherical</i>	0.000	884.015	396.705	169 123.48	0.432
CE	<i>Linear</i>	0.279	0.494	765.816	0.035	0.574
MO	<i>Linear to Sill</i>	0.101	0.223	544.058	0.013	0.310
N Total	<i>Linear to Sill</i>	0.002	712.952	0.004	86 348.783	-0.082
P disp.	<i>Linear to Sill</i>	1.735	18.373	928.486	16.917	0.898
K disp.	<i>Gaussian</i>	0.000	677.780	835.877	32 041.330	0.900
Ca <sup>2+</sup>	<i>Gaussian</i>	0.000	6.886	772.022	5.407	0.850
Mg <sup>2+</sup>	<i>Gaussian</i>	0.000	0.832	858.086	0.100	0.837
K <sup>+</sup>	<i>Gaussian</i>	0.000	6.888	772.266	5.411	0.850
CIce	<i>Gaussian</i>	1.688	17.143	977.318	26.154	0.848
Al <sup>3+</sup>	<i>Linear</i>	0.439	3.336	792.685	0.579	0.933
PCI	<i>Spherical</i>	10.50	528.99	895.29	15 861.293	0.870
PMI	<i>Gaussian</i>	4.30	38.34	837.27	355.103	0.658
PPI	<i>Gaussian</i>	0.50	0.63	1187.72	0.713	0.416
PAI	<i>Gaussian</i>	54.55	802.31	846.83	38 532.094	0.896
RC	<i>Gaussian</i>	0.45	2.46	1112.58	0.412	0.854

CE: 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, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de fósforo intercambiable, PAI: porcentaje de aluminio intercambiable, RC: requerimiento de cal, RMSE: raíz del error cuadrático medio y R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación.

### 3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las interpolaciones geoestadísticas permitieron identificar gradientes espaciales de fertilidad en los suelos de la EEA San Ramón, representados en los respectivos mapas temáticos (Figuras 9-21). Variables claves como el K disponible ( $R^2 = 0.90$ ), P disponible ( $R^2 = 0.90$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.85$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.84$ ), CIC efectiva ( $R^2 = 0.85$ ) y  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable ( $R^2 = 0.93$ ) mostraron una estructura espacial sólida, validando su uso como base para la delimitación de zonas de manejo.

Estos gradientes reflejan contrastes claros en la distribución de nutrientes y propiedades químicas, permitiendo identificar sectores con alta o baja fertilidad relativa. La cartografía generada con estas variables facilita la planificación de prácticas agronómicas diferenciadas, como la aplicación localizada de insumos y corrección de limitantes edáficos.

Los mapas obtenidos constituyen una herramienta operativa para el manejo sitio-específico, al integrar información espacialmente coherente sobre la disponibilidad de nutrientes, acidez y capacidad de intercambio. Esta aproximación mejora la eficiencia del manejo agronómico y permite avanzar hacia una gestión más sustentable del recurso suelo en la estación.

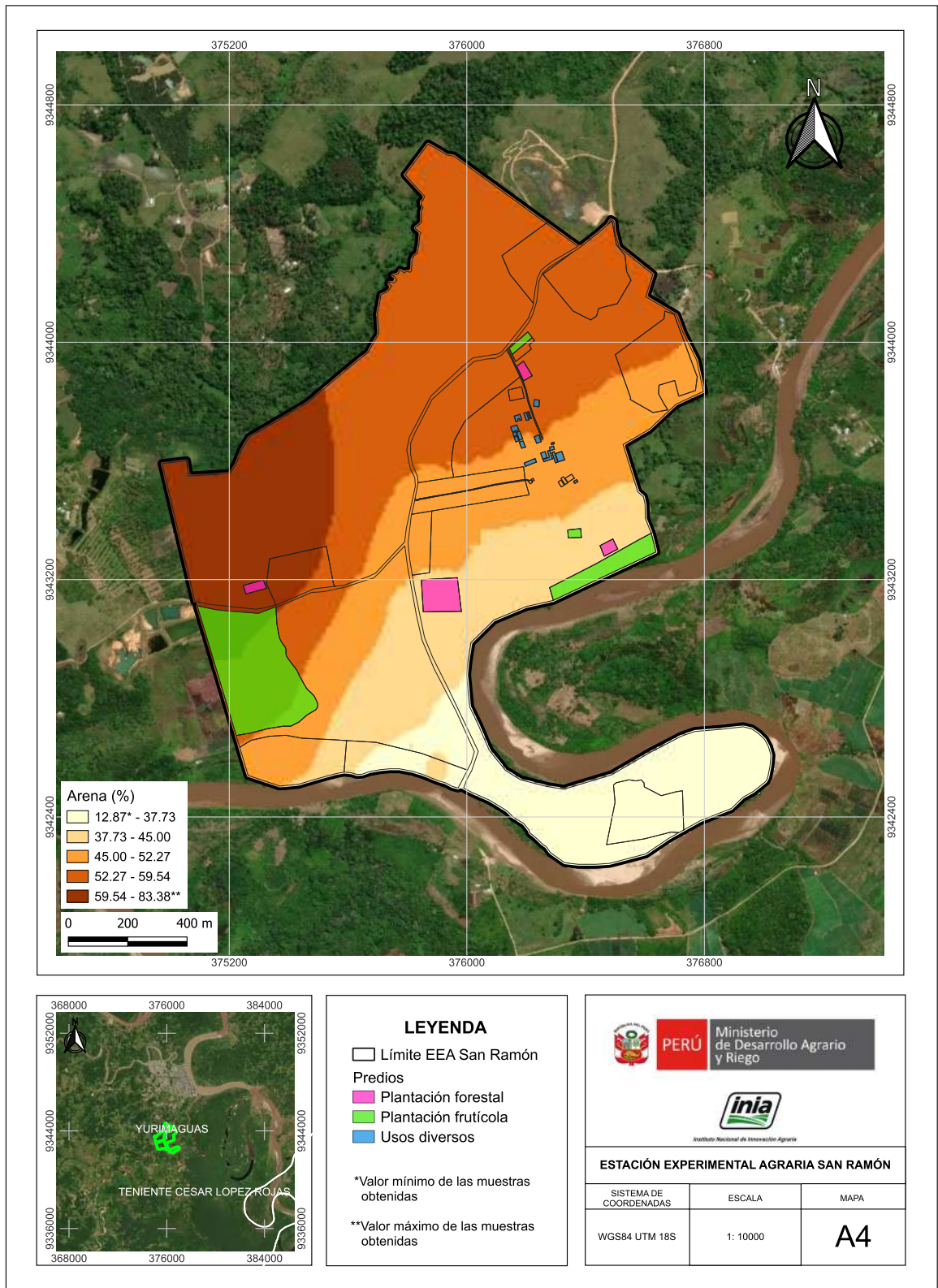


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

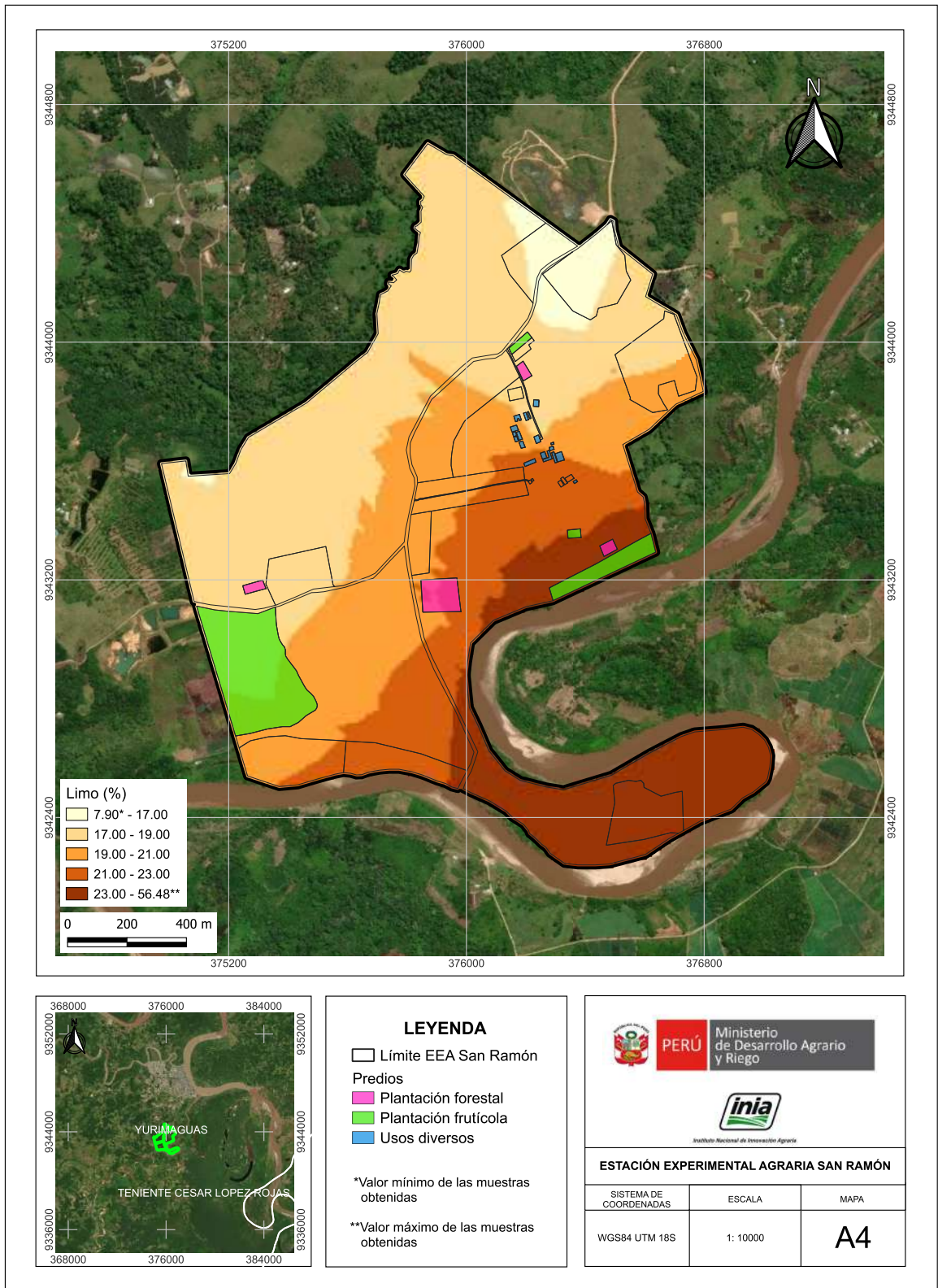


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

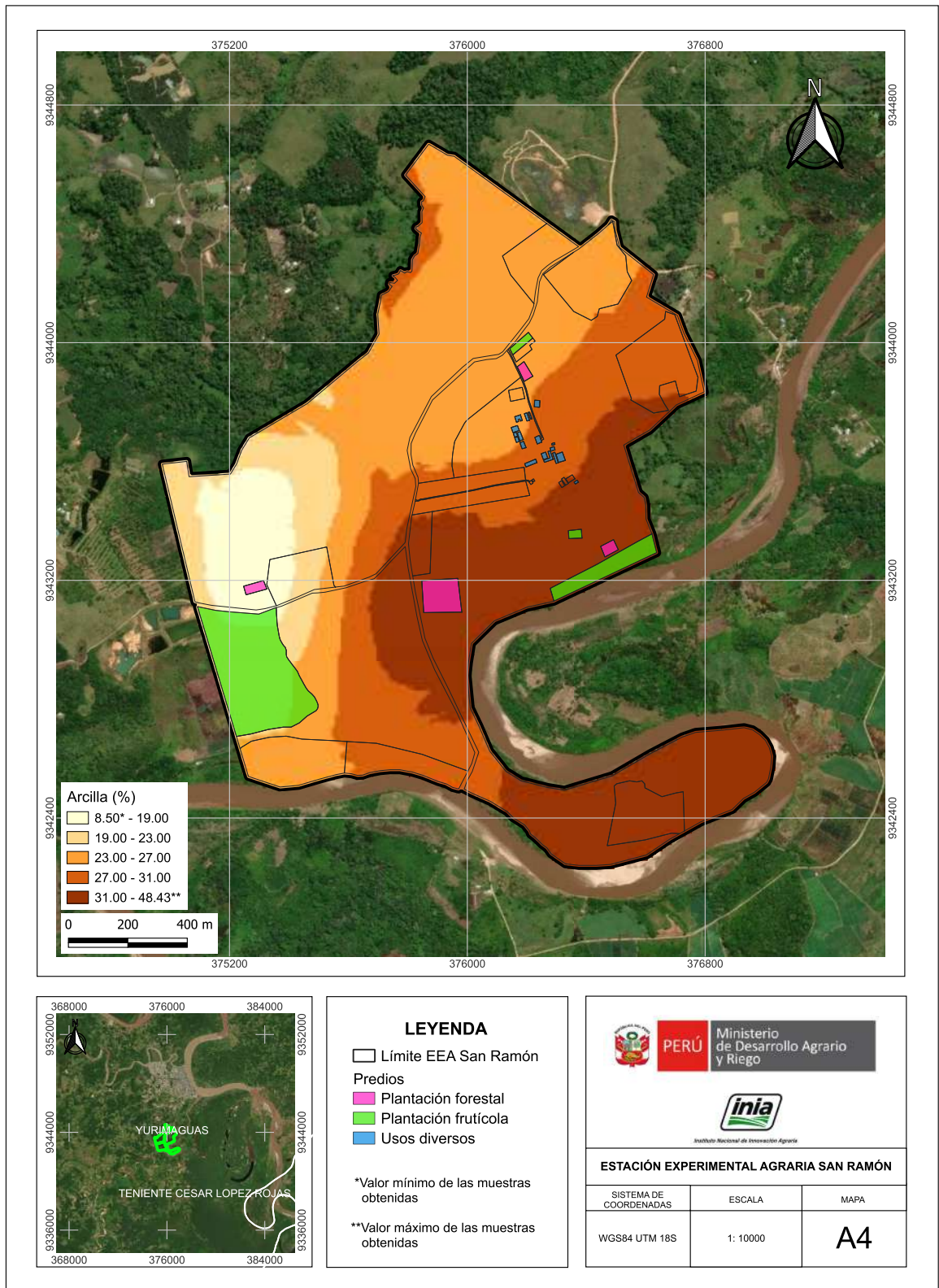


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

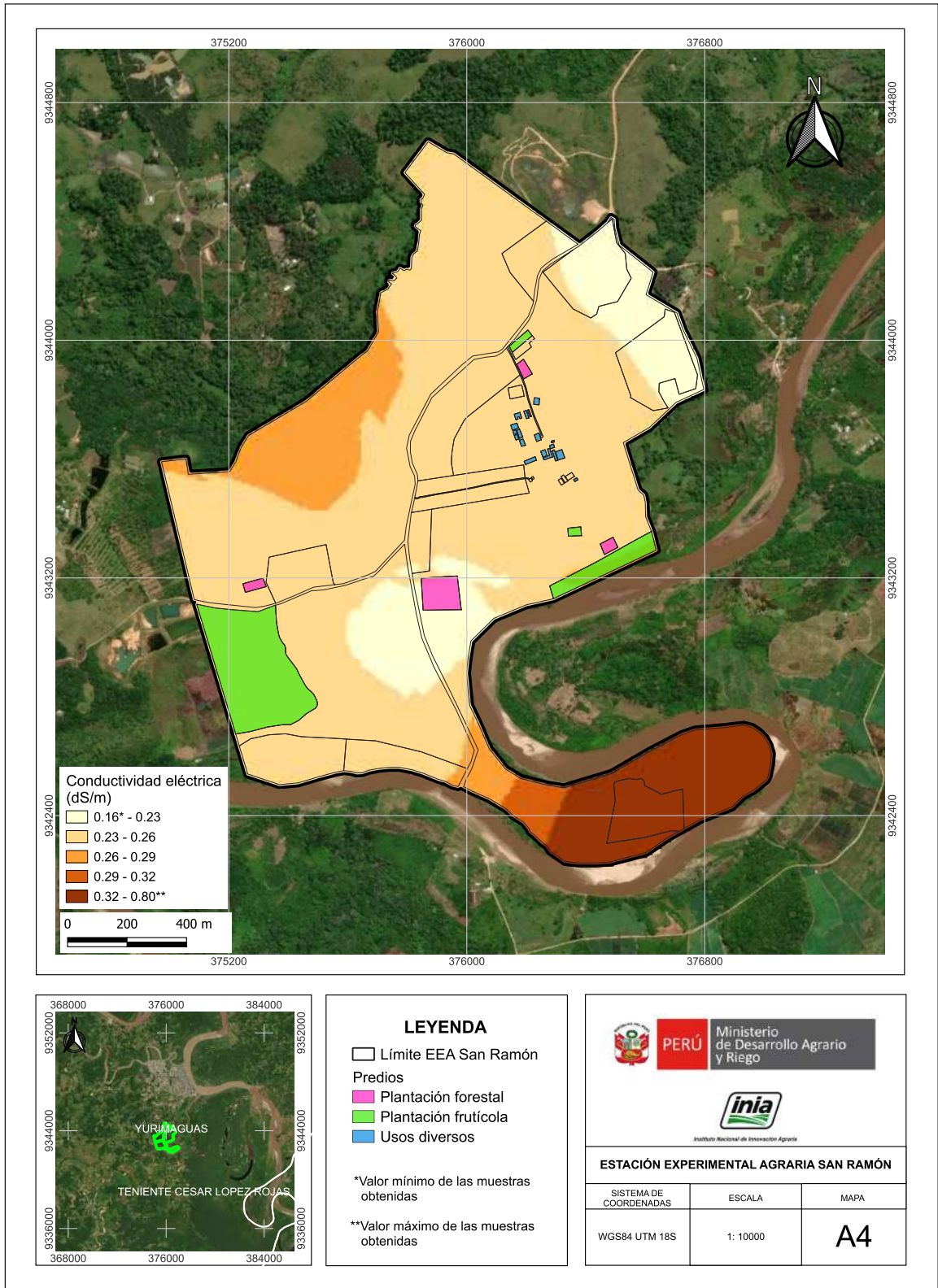


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

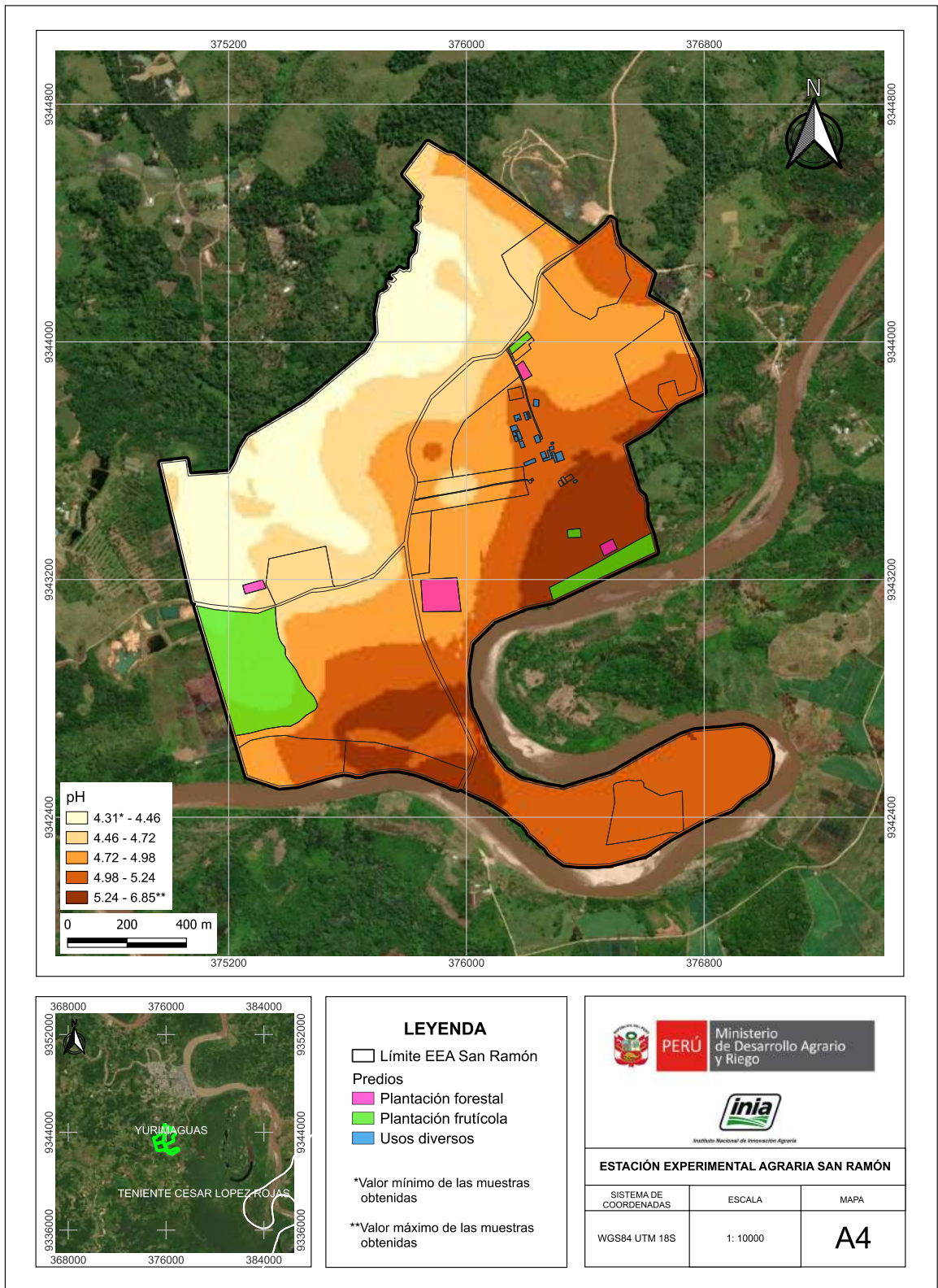


Figura 13. Mapa de variación espacial del pH

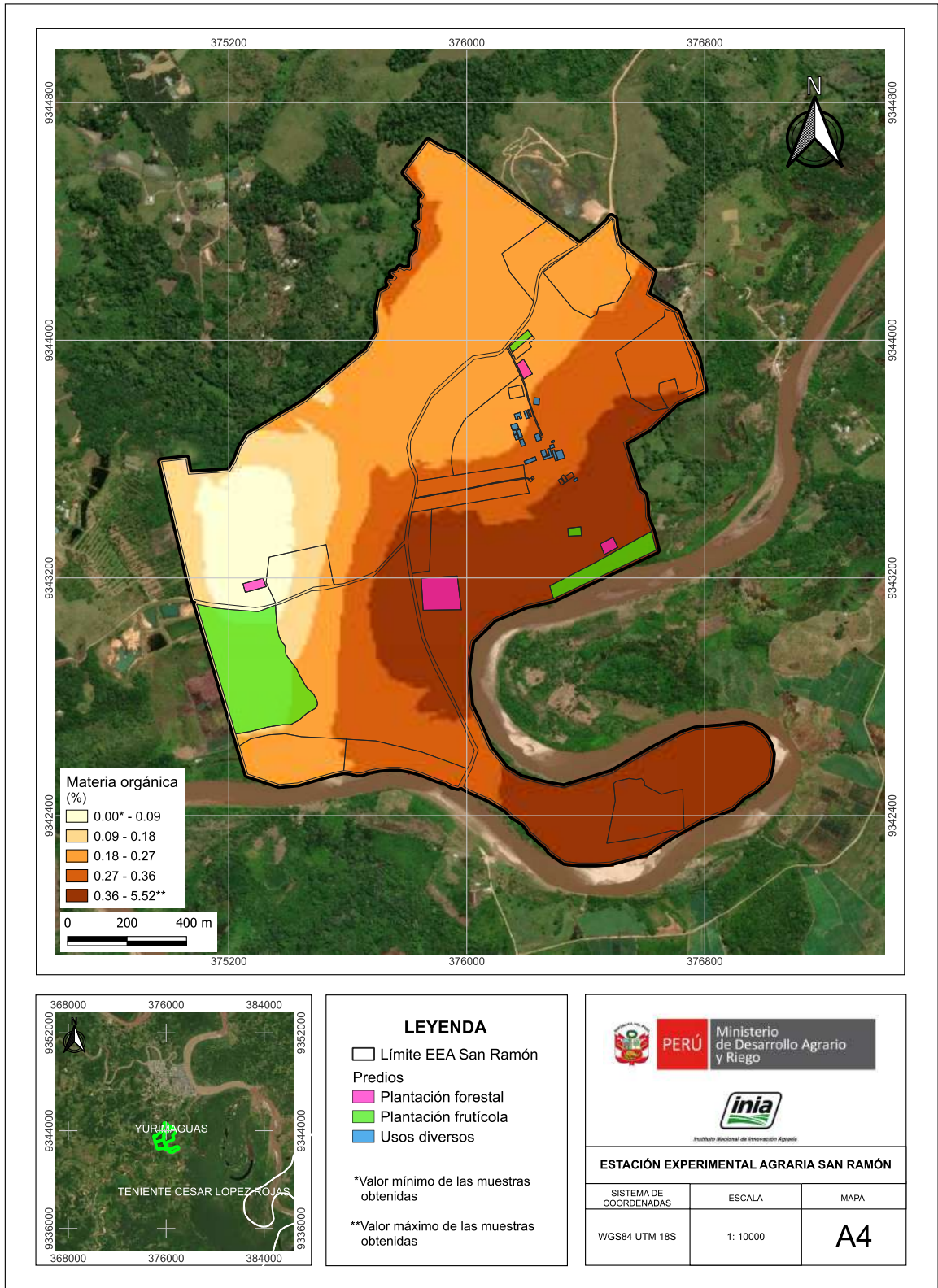


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de la materia orgánica

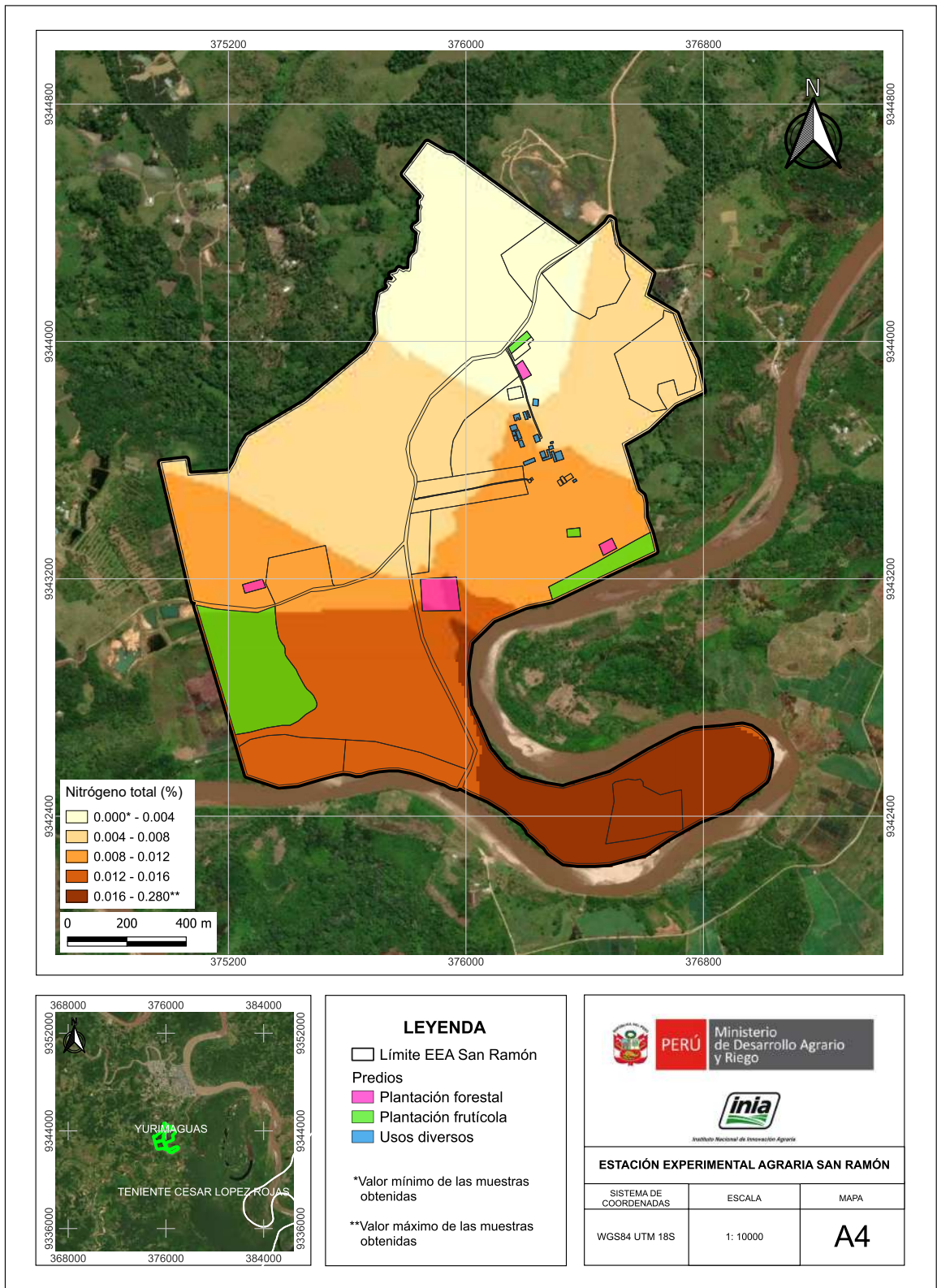


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

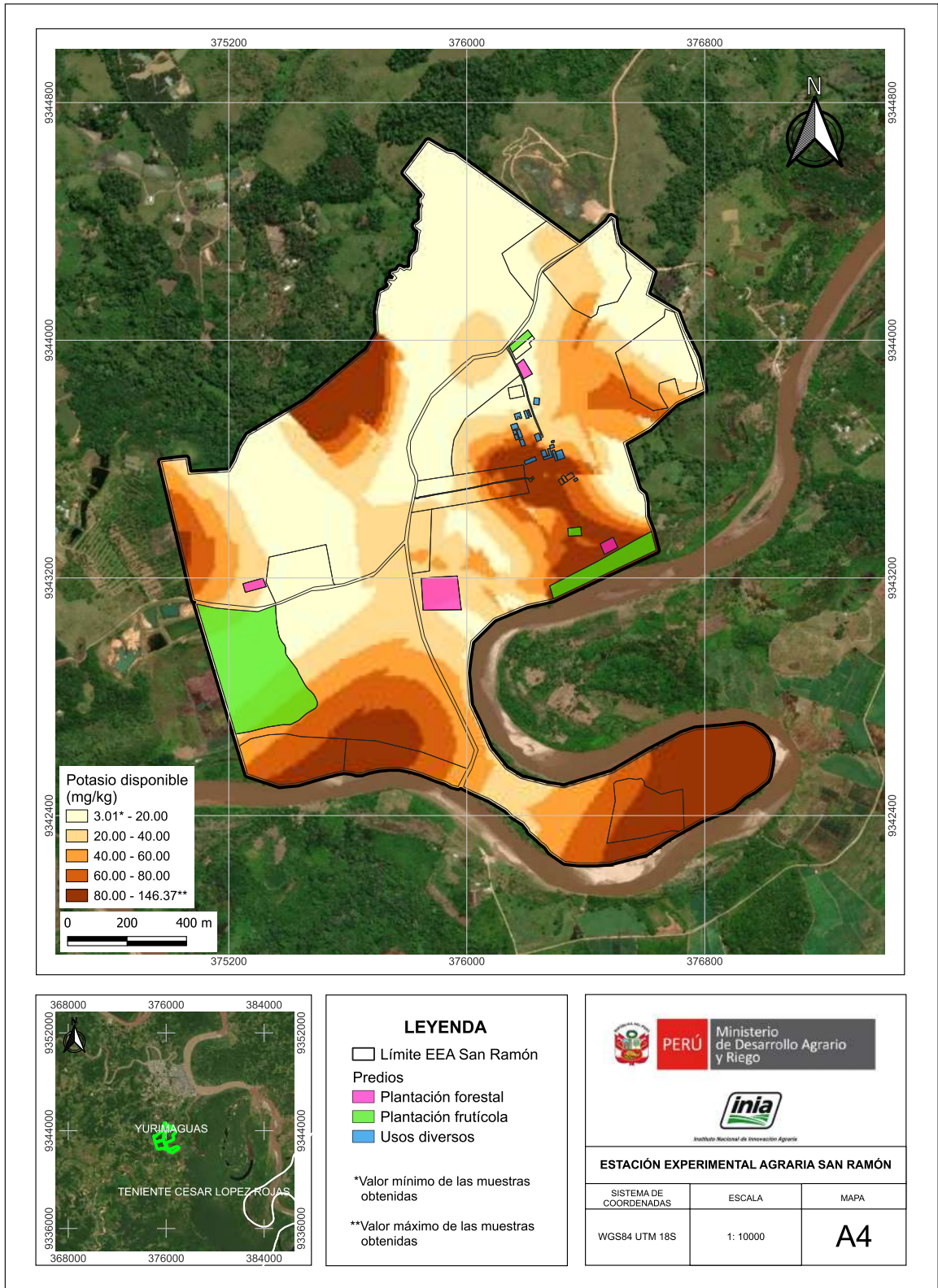


Figura 16. Mapa de variación espacial de la concentración del potasio disponible

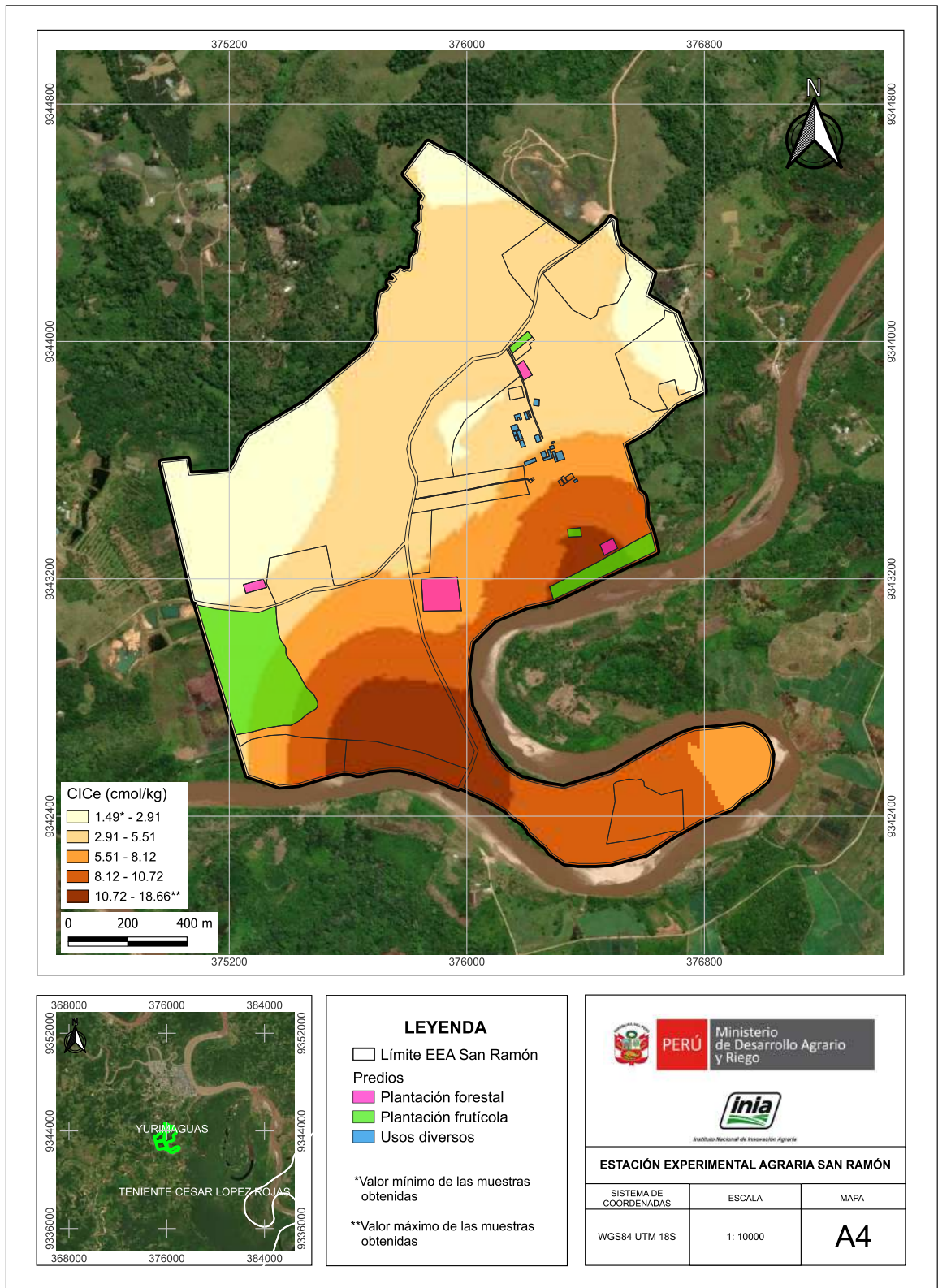


Figura 17. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)

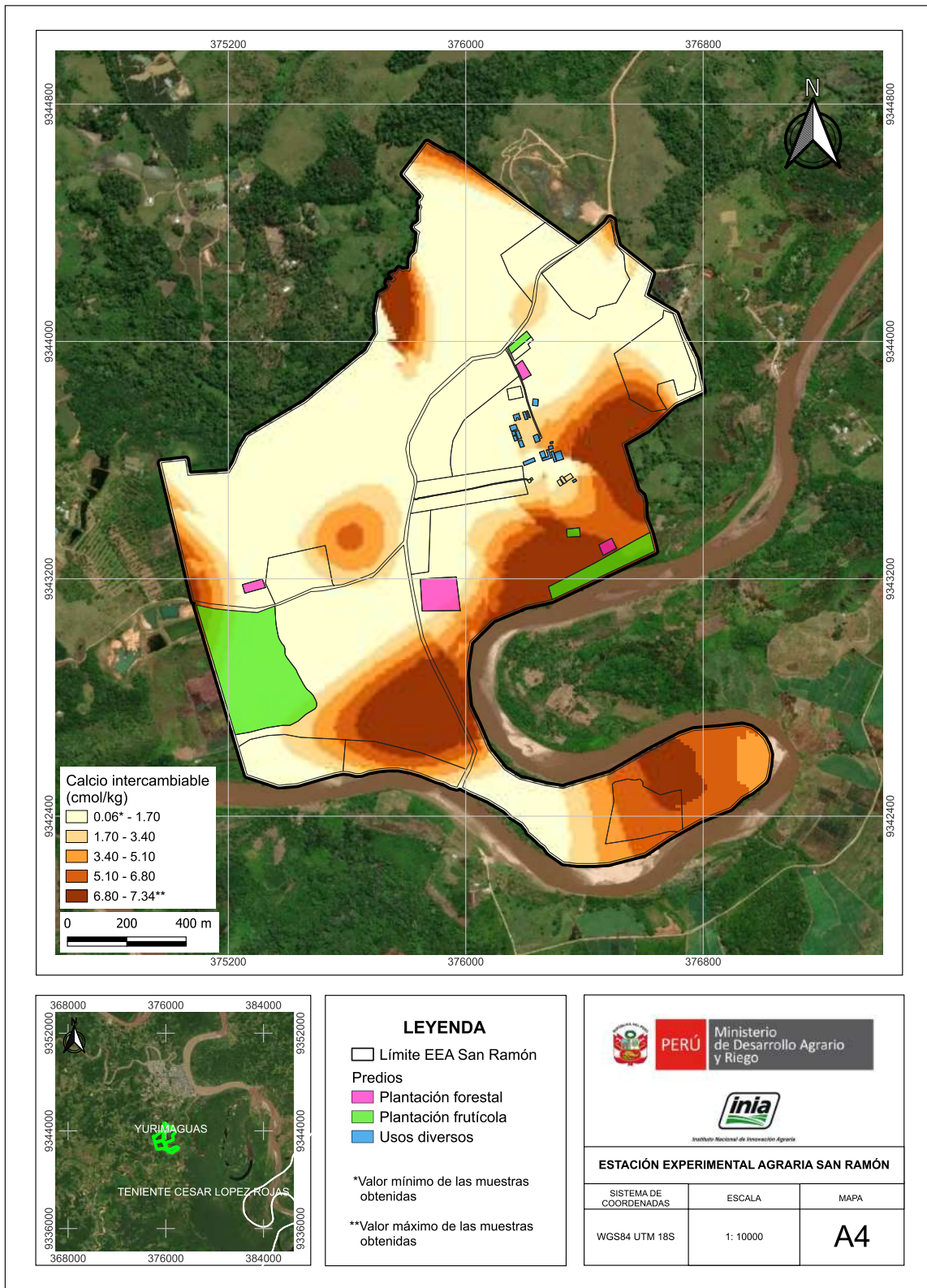


Figura 18. Mapa de variación espacial del calcio ( $Ca^{2+}$ ) intercambiable

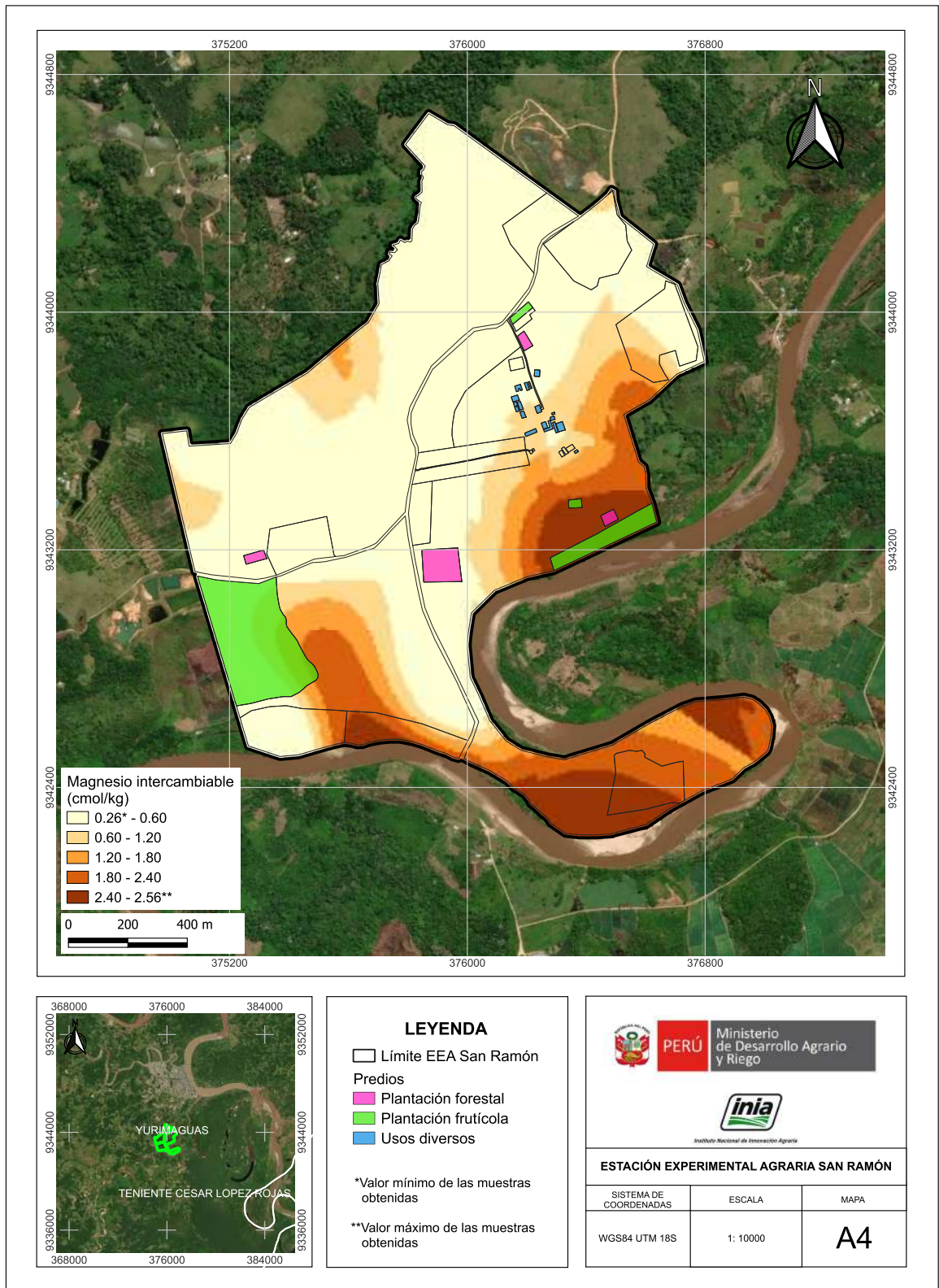


Figura 19. Mapa de variación espacial de la concentración de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) intercambiable

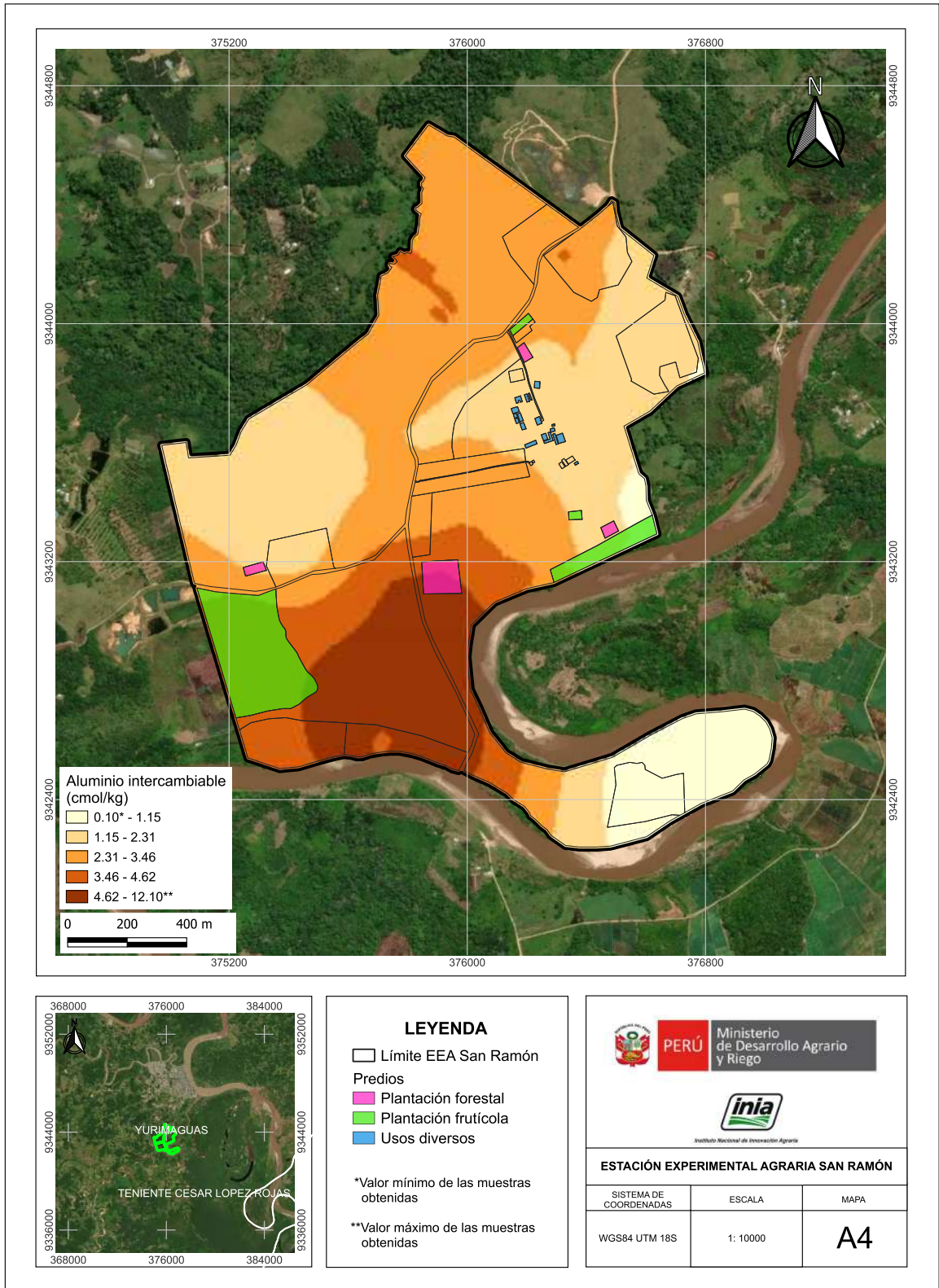


Figura 20. Mapa de variación espacial de la concentración de aluminio ( $Al^{3+}$ ) intercambiable

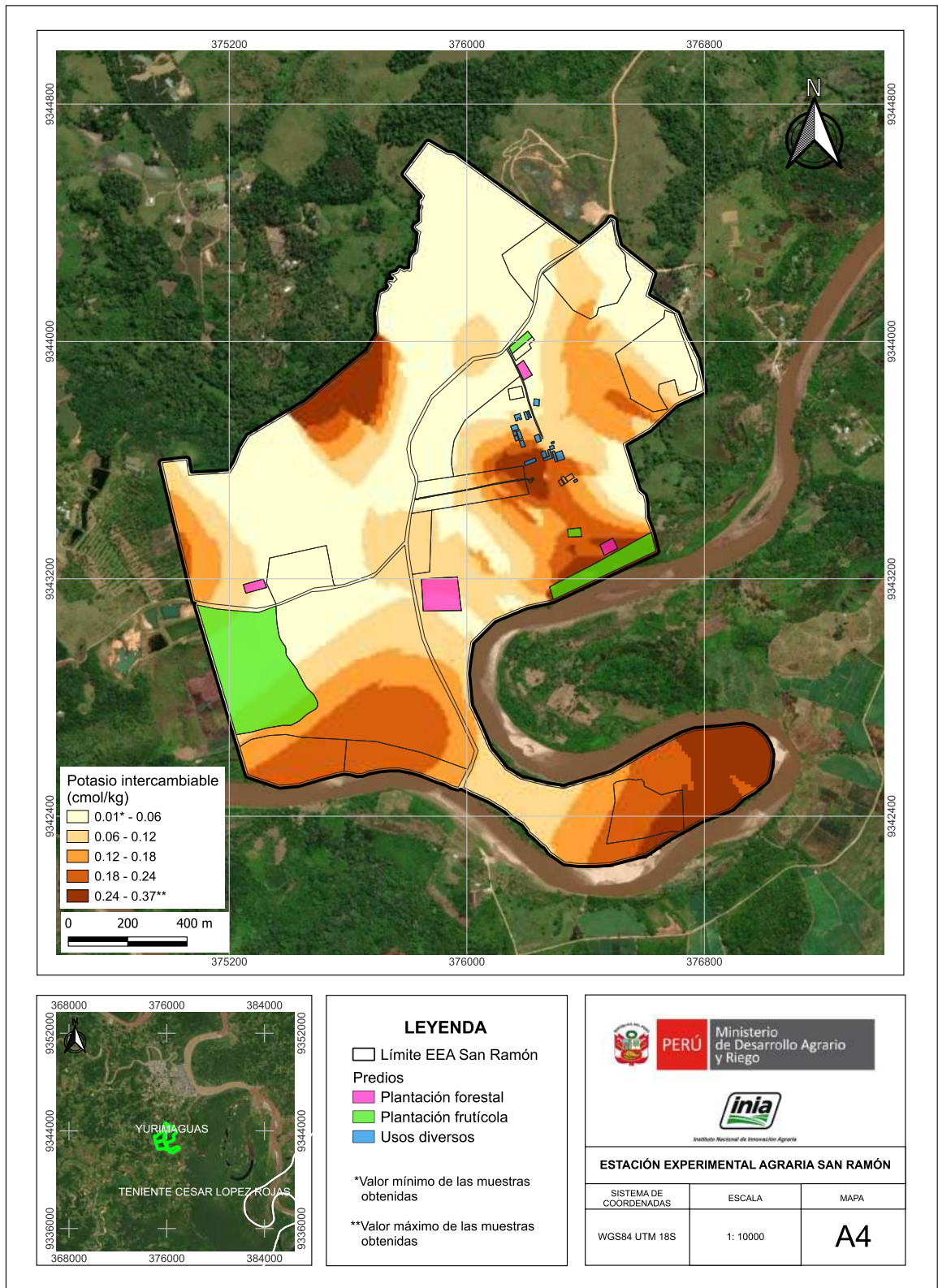


Figura 21. Mapa de variación espacial de la concentración de potasio (K<sup>+</sup>) intercambiable



PERU Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

inía

Cinco Décadas de Perseverancia

CENTENARIO DEL PERU 1912-2022

**inía**

Instituto Nacional de Innovación Agraria

Estación Experimental Agraria

**San Ramón**

MAGUAS - ALTO AMAZONAS - LORETO

YouTube Instagram LinkedIn

inía Peru



## 4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA San Ramón

### 4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

#### 4.1.1. Zonificación de encalado y balance catiónico para optimizar la fertilidad de los suelos

Para ilustrar este análisis se tomará como ejemplo el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), que demanda un balance catiónico óptimo y una adecuada reserva de bases para garantizar tanto su producción como la calidad de los granos. En los suelos de la EEA San Ramón, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) promedio de  $5.83 \pm 4.22$   $\text{cmol kg}^{-1}$  (CV = 72.45 %) indica una reserva limitada de cationes en el complejo de cambio, reduciendo la capacidad de amortiguamiento del pH y la retención de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Consecuentemente, los porcentajes de saturación de bases catiónicas observadas ( $24.37 \pm 22.08$  % para  $\text{Ca}^{2+}$  y apenas  $1.67 \pm 0.80$  % para  $\text{K}^+$ ) se sitúan muy por debajo de los rangos recomendados para cacao, donde se sugiere un porcentaje de saturación de  $\text{Ca}^{2+}$  mínima de 50 % y de  $\text{K}^+$  de al menos 3-5 %. Estas deficiencias comprometen el desarrollo radicular, la translocación de fotoasimilados y la formación de estructuras de reserva, por lo que el encalado y la aplicación de fuentes potásicas específicas deben ajustarse para elevar la saturación de bases a niveles óptimos.

Desde el punto de vista geoestadístico, las variables de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y CICe se ajustaron a semivariogramas gaussianos con rangos de dependencia espacial superiores a 770 m y altos coeficientes de determinación ( $R^2$  entre 0.837 y 0.87). Esta estructura espacial robusta y continua permite generar mapas de fertilidad confiables de variables derivadas de estos cationes intercambiables (PCI, PMI y PPI), facilitando la zonificación de la estación experimental (Figuras 22-24), según necesidades de enmiendas calcáreas o potásicas y optimizando la aplicación de insumos.

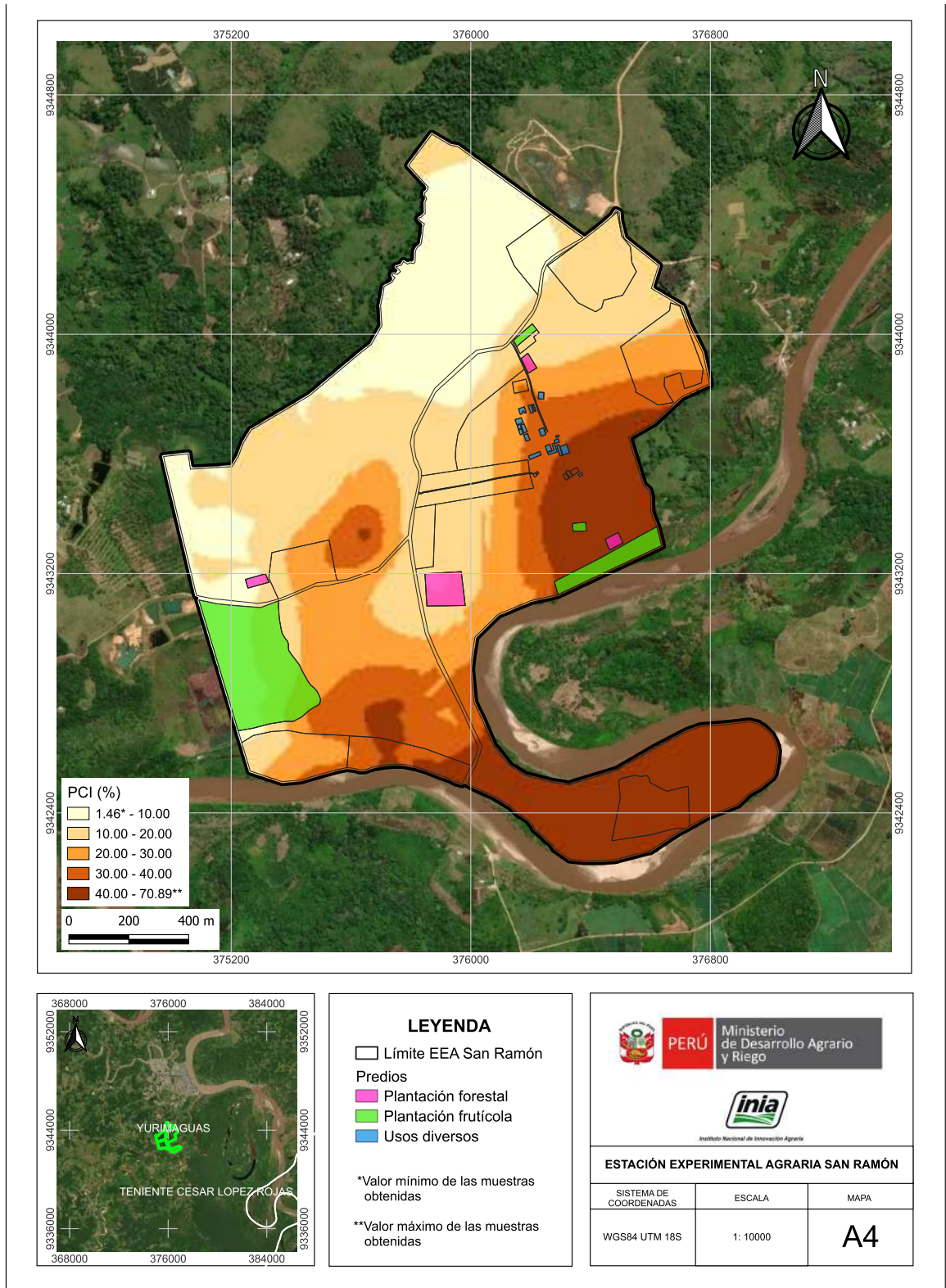


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable (PCI)

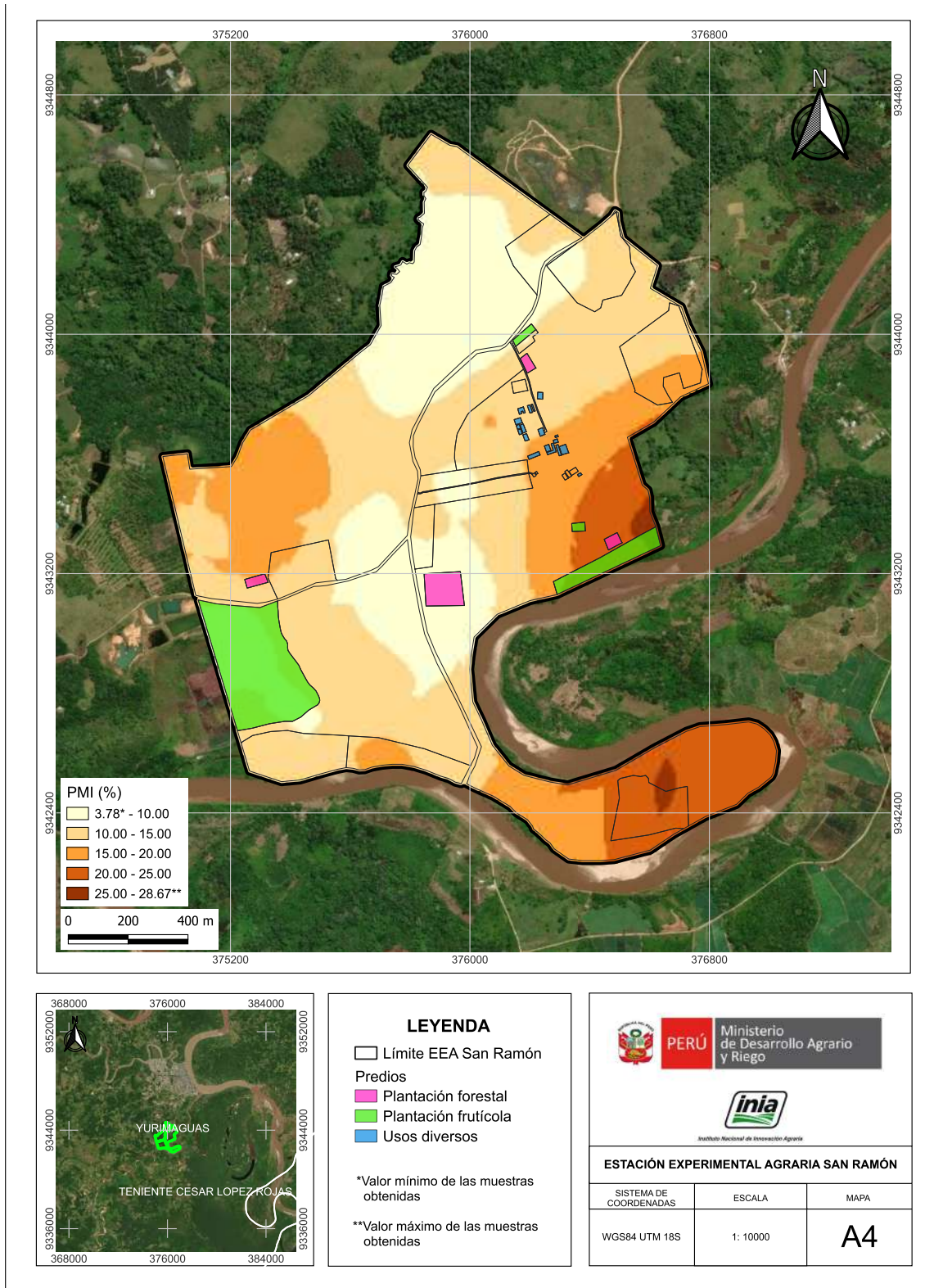


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable (PMI)

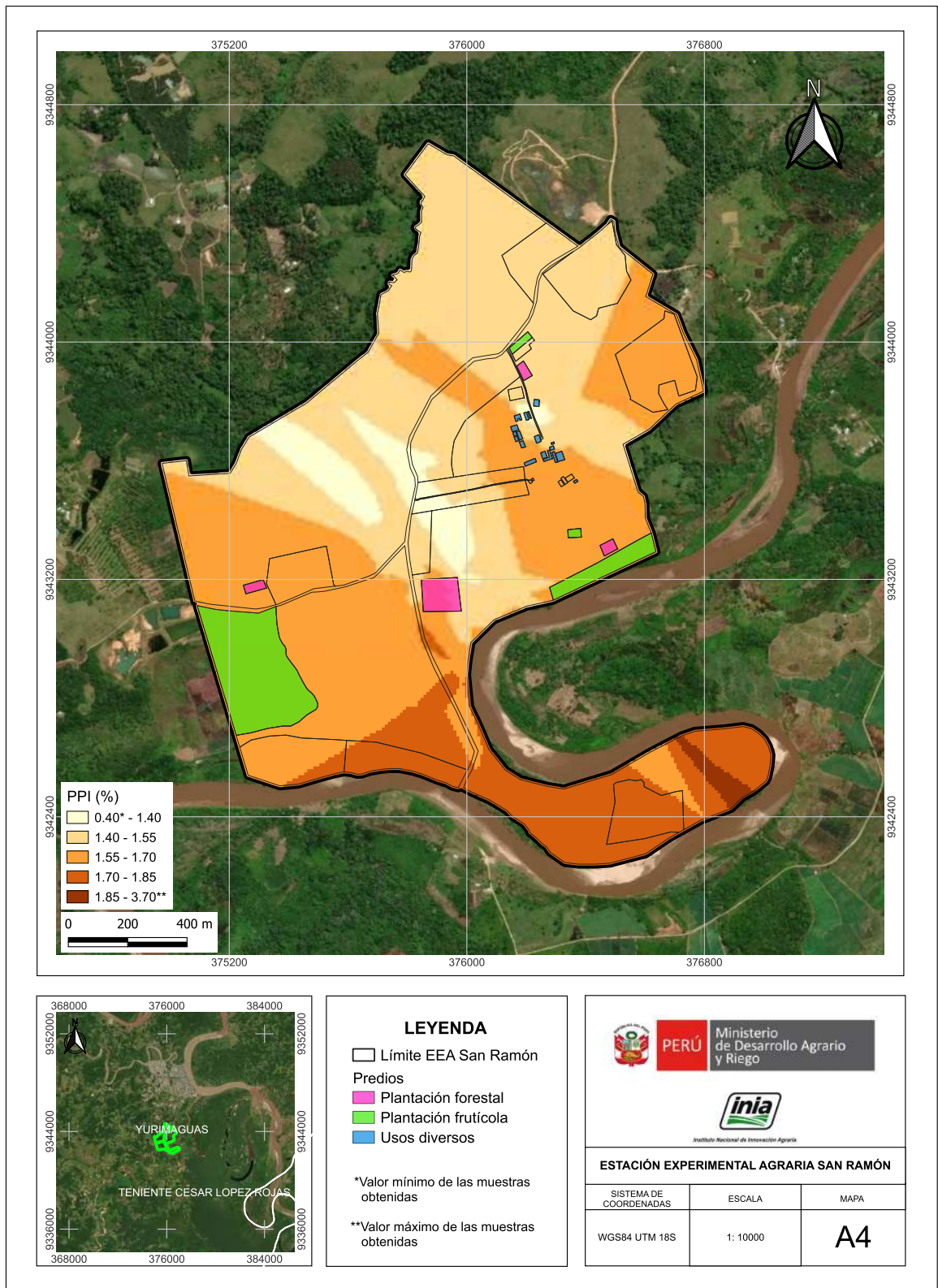


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable (PPI)

Además, el  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable (un indicador clave del BCSR) alcanzó una concentración media de  $2.99 \pm 2.31 \text{ cmol kg}^{-1}$  y un porcentaje de saturación de  $\text{Al}^{3+}$  del  $61.08 \pm 26.66 \%$  ( $\text{CV} = 43.65 \%$ ), muy por encima del umbral crítico del  $15 \%$ , a partir del cual el cacao (*Theobroma cacao* L.) comienza a manifestar fitotoxicidad. En estas condiciones, las raíces del cultivo sufren malformaciones radiculares, pérdida de pelos corticales y una absorción deficiente de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , provocando menor vigor vegetativo, reducción de floración, y descenso en la producción y calidad de los granos. La elevada dependencia espacial del  $\text{Al}^{3+}$  ( $R^2 = 0.93$ ) y el PAI ( $R^2 = 0.90$ ), con un rango de alcance entre 792.69 m y 846.83m, indica una distribución estable en el paisaje, convirtiendo al  $\text{Al}^{3+}$  y al PAI en los criterios adecuados para definir zonas críticas de acidez (Figura 25). De este modo, el mapeo de  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable (con sus altos niveles de saturación) permite identificar con precisión las áreas más vulnerables del cacao y fundamenta la aplicación localizada de encalado con el objetivo de elevar el pH, precipitar el  $\text{Al}^{3+}$  y restablecer un entorno radicular óptimo que maximice rendimiento y calidad.

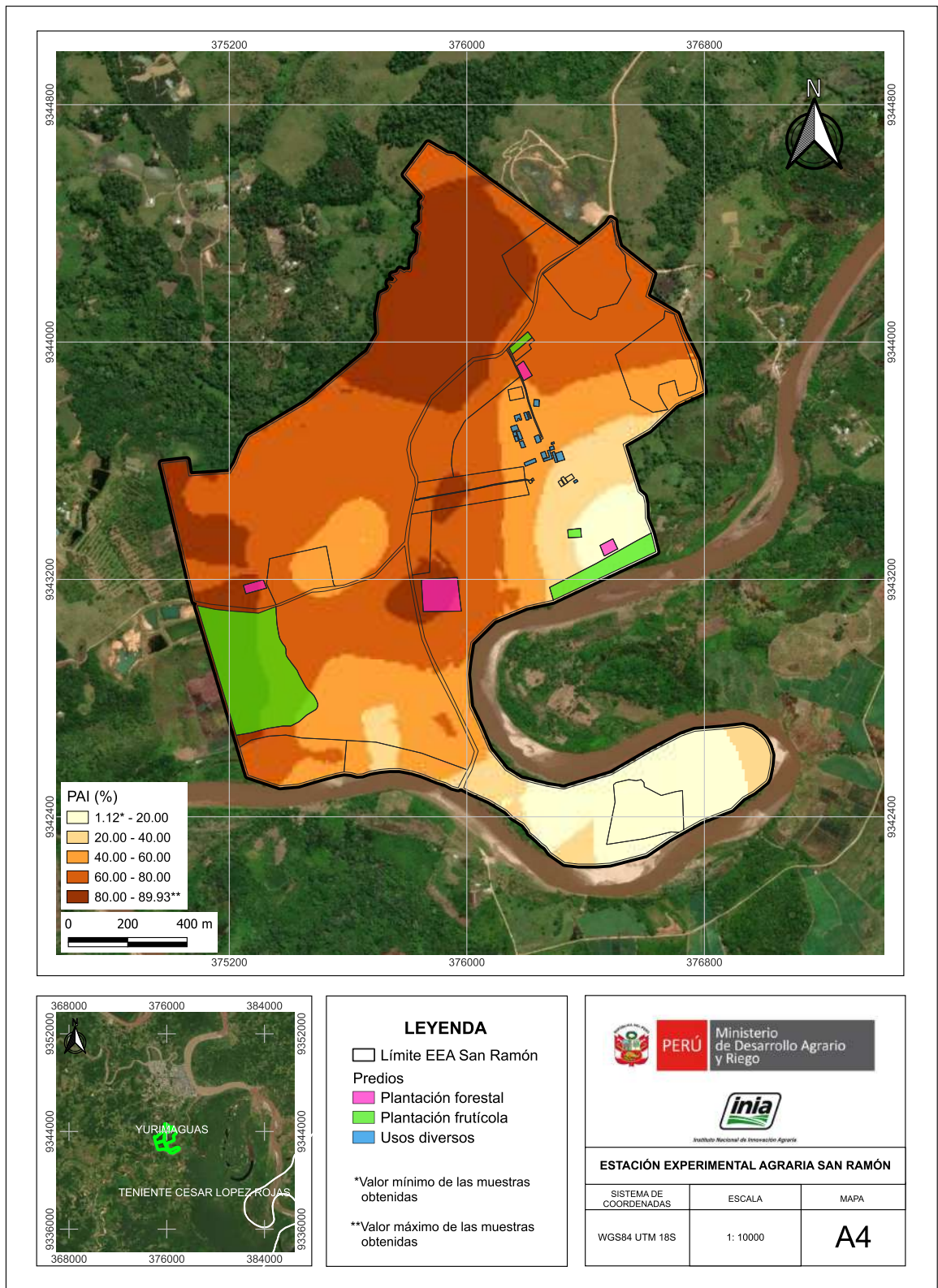


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de aluminio intercambiable (PAI)

Dado que la fracción de arcilla presentó una baja predictibilidad espacial ( $R^2 = 0.085$ ), lo cual limita su utilidad para representar con precisión su distribución en el área, y considerando además que los contenidos de materia orgánica en los suelos son inferiores al 4 %, se optó por emplear el método de acidez potencial propuesto por Teixeira et al. (2014) para estimar el requerimiento de cal agrícola. Este enfoque permite calcular las dosis de encalado a partir de la acidez intercambiable, prescindiendo de variables con alto grado de incertidumbre espacial como la textura, y resulta más apropiado en contextos de alta acidez y baja capacidad tampón, como los observados en la EEA San Ramón.

La fórmula para estimar la dosis de cal (RC) en  $t\ ha^{-1}$  sería la siguiente:

$$RC = -0.086 + (0.7557 \times Al^{3+}) \quad \dots(12)$$

Mediante este procedimiento se ha estimado que el requerimiento de encalado para las zonas más degradadas es entre 2.71 y 9.06  $t\ ha^{-1}$  de cal agrícola (Figura 26). De esta manera, la aplicación de cal agrícola permitirá incrementar el pH del suelo, la fertilidad potencial en función a un aumento de las cargas variables del suelo y los contenidos de  $Ca^{2+}$  intercambiable. Además, permitirá superar la reactividad de los precipitados de fosfatos de Fe y Al, y los efectos tóxicos del aluminio e hidrógeno en el crecimiento radicular y la absorción de potasio. Asimismo, se evita un sobre encalado en zonas donde se requieren menores dosis, para evitar la adsorción y reducción de disponibilidad de boro.

De forma complementaria, se ha demostrado que la enmienda orgánica biochar es un excelente agente encalante (Bolan et al., 2023). Por esta razón se recomienda complementar la dosis anual de cal, con 3  $t\ ha^{-1}$  de biochar de residuos municipales (Condori-Ataupillco et al., 2025).

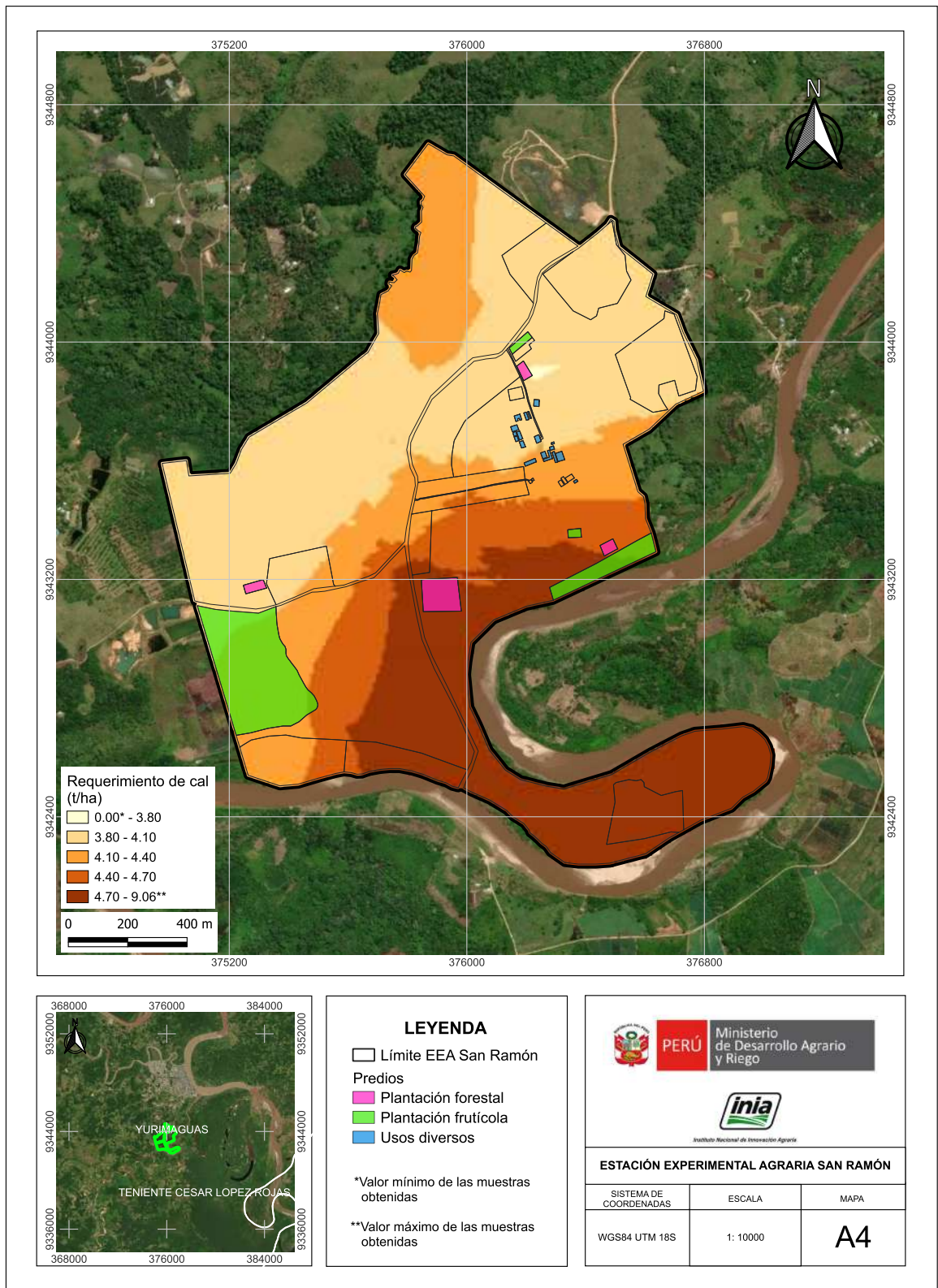


Figura 26. Mapa de variación espacial del requerimiento de cal

## 4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

### 4.2.1. Zonificación de niveles deficientes de P-Bray del suelo y dosificación de la fertilización fosforada para cacao

En el cultivo de cacao, el fósforo es fundamental para el desarrollo de raíces, floración y brotes jóvenes (Carmona-Rojas, 2022). En la EEA San Ramón, el fósforo disponible (P-Bray) ajustó a un modelo *linear to sill* ( $C_0 = 1.74$ ,  $C_0 + C = 18.37$ , alcance = 928.5 m) con un  $R^2 = 0.90$ , lo que garantiza una interpolación robusta para estimar dosis de fertilización fosforada.

Considerando que concentraciones inferiores a  $12 \text{ mg kg}^{-1}$  se asocian a deficiencias críticas que limitan la elongación de pelos radicales y reducen la eficiencia fotosintética, mientras que valores entre 15 y  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (dependiendo del criterio textural) se consideran adecuados para cubrir las exigencias del cacao sin riesgo de fijación notable (Van Vliet et al., 2015), nuestros análisis revelaron un rango puntual de 1.40 a  $44.52 \text{ mg kg}^{-1}$  (CV = 106 %). Con base en estos datos y los patrones de variabilidad espacial, se han definido cinco zonas de diferente requerimiento de fertilización fosforada (Figura 27), cada una con rangos de P-Bray predichos que permiten ajustar las dosis de fertilizante para optimizar al mismo tiempo la eficiencia del uso del fósforo y la calidad fisiológica del cultivo.

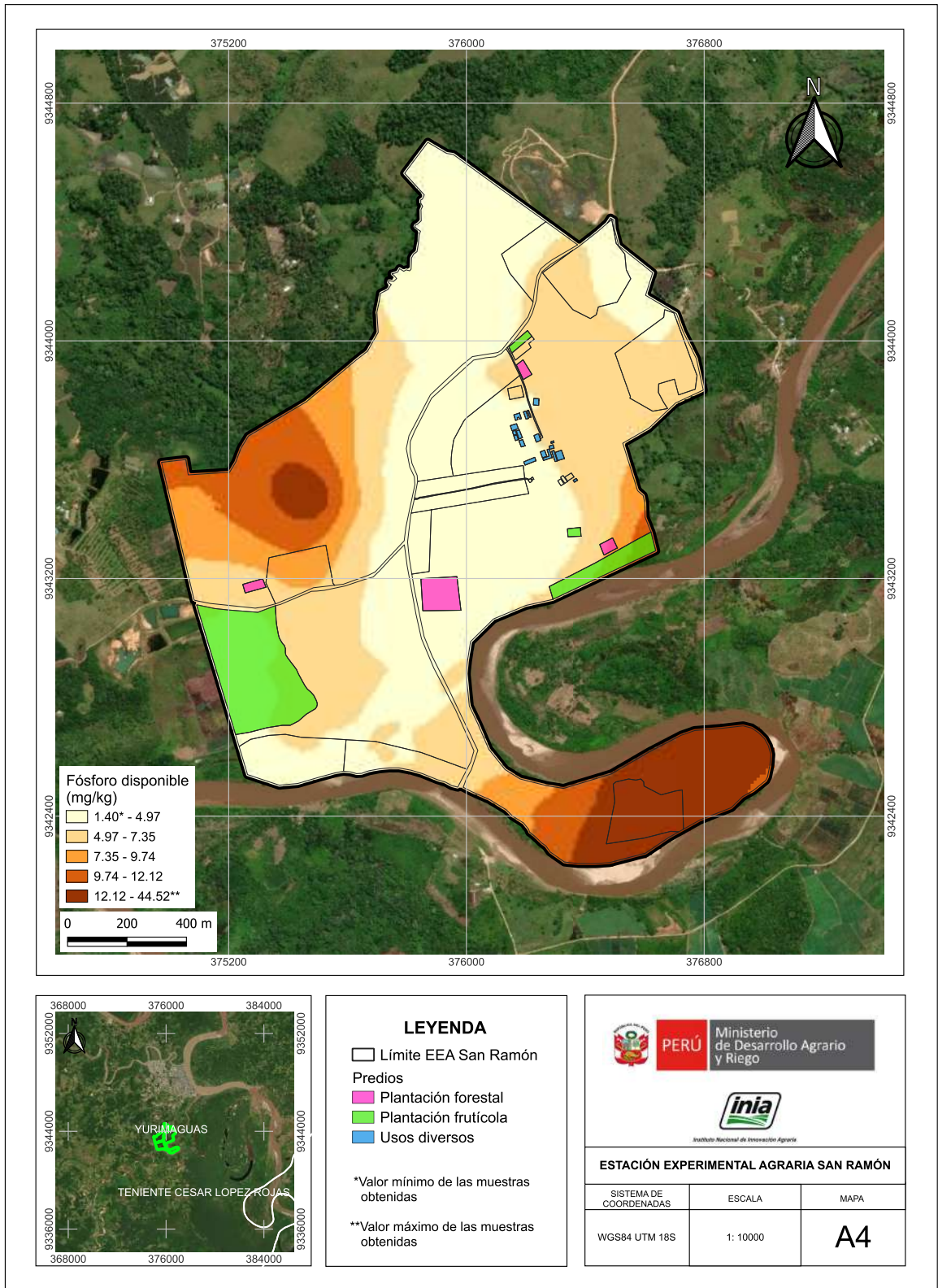


Figura 27. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

Para los cálculos de fertilización fosfatada en el cultivo de cacao, se tomó como referencia el valor de P-Bray de la zona más crítica (4.97 mg kg<sup>-1</sup>). Con este dato, se estimaron los requerimientos de fertilización de mantenimiento y construcción, considerando lo siguiente:

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<sup>-1</sup>. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 4.97 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.

**Primer paso:** calcular el rendimiento con 4.97 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 2 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 0.6 \text{ t ha}^{-1}$$

**Segundo paso:** hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 20 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.2 \times 0.6 \text{ t ha}^{-1} = 0.12 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 0.12 \text{ t ha}^{-1} + 0.6 \text{ t ha}^{-1} = 0.72 \text{ t ha}^{-1}$$

**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.

$$\text{Requerimiento de P} = 4 \text{ kg de P t}^{-1} \times 0.72 \text{ t ha}^{-1} = 2.88 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{2.88 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 14.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

**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 9 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.

$$RC = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 14.40 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 27.90 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 122.87 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico (52 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Con esta dosis anual de fosfato monoamónico, 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.





## 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.
- 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.
- 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>
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Van Zwieten, L., Sooriyakumar, P., Khan, B. A., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., Rinklebe, J., Wang, H., Singh, B. P., y Siddique, K. H. M. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollut*, 317, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120632>
- 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*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- 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>
- 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>
- Carmona-Rojas, L.M., Gutiérrez-Rodríguez, E.A., Henao-Ramirez, A.M., y Urrea Trujillo, A.I. (2022). Nutrición en los cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L.): ¿Qué factores que deben ser considerados? *Revista de la Facultad de Agronomía*, 121(2), 1-21. <https://doi.org/10.24215/16699513e101>
- 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/>

- 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), 1-14. <https://doi.org/10.1002/sae2.70036>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., 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/agj2.20995>
- 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* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Garbano-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., y Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41. [dx.doi.org/10.14350/rig.54706](https://doi.org/10.14350/rig.54706)
- García, F. O., y Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. *Informaciones Agronómicas*, (3), 17-25. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2011/09/17.pdf>
- Graham, E. R. (1959). *An explanation of theory and methods of soil testing*. Bulletin 734. University of Missouri, Agricultural Experiment Station. <https://mdh.contentdm.oclc.org/digital/collection/agexptstn/id/25261/>
- Hartemink, A. E., y Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil* 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- 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>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India. [https://www.researchgate.net/profile/Praveen-Kumar-521/publication/366175716\\_Soil\\_Fertility\\_and\\_Fertilizers\\_by\\_John\\_L\\_Havlin\\_z-liborg/links/63948fbde42faa7e75af15db/Soil-Fertility-and-Fertilizers-by-John-L-Havlin-z-liborg.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Praveen-Kumar-521/publication/366175716_Soil_Fertility_and_Fertilizers_by_John_L_Havlin_z-liborg/links/63948fbde42faa7e75af15db/Soil-Fertility-and-Fertilizers-by-John-L-Havlin-z-liborg.pdf)
- 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*.
- 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>
- Labrador, J. (2008). *Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica* (Manual técnico). Sociedad Española de Agricultura Ecológica. <https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/01/manual-suelos-jlabrador.pdf>
- 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>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*, 29, 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), 78-86. <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>
- 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., 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/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación* (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Teixeira, W. G., Alvarez V, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, 1-20. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200078>

- 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), 1-21. <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* [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 Chincha - Ica





*Instituto Nacional de Innovación Agraria*







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

ISBN: 978-9972-44-248-3



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

      @INIAPeru