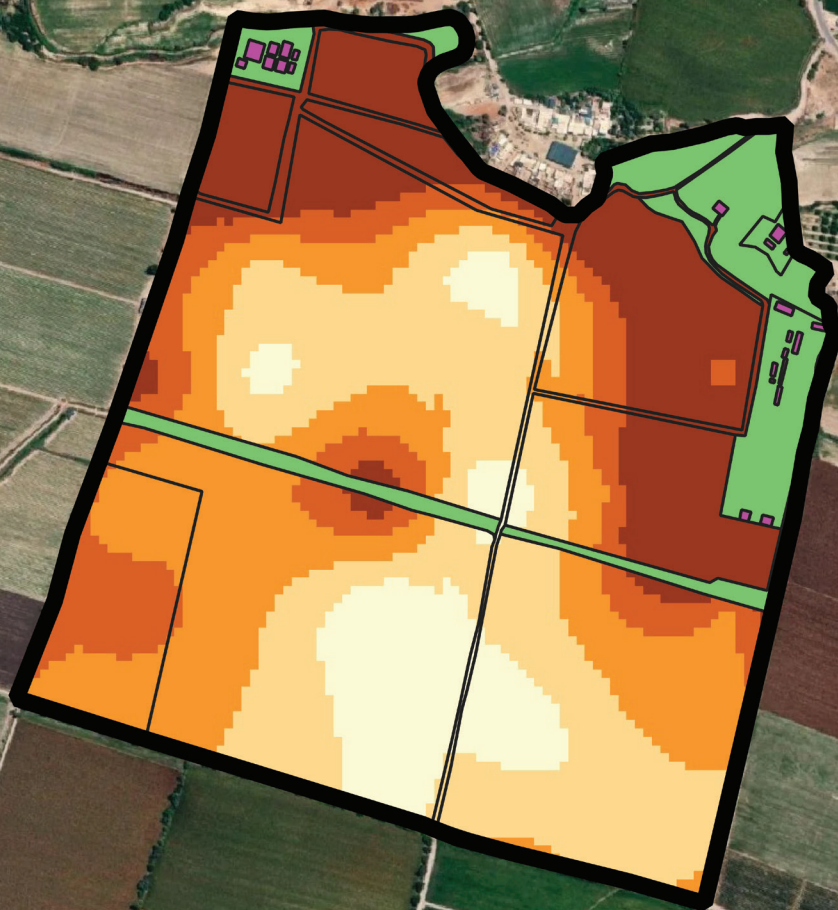


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Chincha



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 Chíncha



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA CHINCHA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Marco Antonio Vinelli Ruiz

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Manuel Felipe Layseca Ortigas

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

José Angello Tangherlini Casal

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Christian Alfredo Barrantes Bravo, Dr.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Septiembre, 2026

Publicado:

Septiembre, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-278-0

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° 2026-10859

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Joseph Campos-Ruiz, 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 Chíncha	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 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 Chíncha	61
4.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficitarios de Mg^{2+} y K^+	61
4.2. Variación espacial de la conductividad eléctrica	61
4.3. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	63
4.3.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según los criterios de mantenimiento y construcción para la vid	63
4.3.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según el criterio de suficiencia para la vid	65
5. Referencias bibliográficas	67



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.

En el marco del proyecto, se realizaron estudios de variación espacial de la fertilidad de los suelos en diversas Estaciones Experimentales Agrarias del INIA a nivel nacional, mediante el uso de herramientas avanzadas de análisis geoespacial. La Estación Experimental Agraria Chincha (EEA Chincha), ubicada en la región Ica, constituye un punto de referencia para el desarrollo de estudios similares dentro del ámbito regional de Ica, contribuyendo a la generación de información base para futuras investigaciones en el territorio.

En este contexto, el manual “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Chincha” presenta los resultados del muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, describe de manera práctica la metodología de análisis geoespacial utilizada, la cual puede ser replicada en otros sistemas agrícolas. La información obtenida permite optimizar la toma de decisiones relacionadas con la fertilización y el manejo agronómico, promoviendo un uso más eficiente de los insumos agrícolas, la reducción de pérdidas de nutrientes y la sostenibilidad de la productividad dentro de la estación.

Dr. Christian Alfredo Barrantes Bravo
Presidente Ejecutivo
Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

En la región de Ica, ubicada en la costa centro-sur del Perú, el sector agropecuario constituye una de las principales actividades económicas, siendo la tercera con mayor aporte al valor agregado bruto departamental. La región destaca por su producción agrícola orientada tanto a la exportación, con cultivos como espárrago, uva y palta, como al mercado interno, donde sobresalen el maíz amarillo duro, el camote y la papa. Asimismo, Ica se caracteriza por presentar extensas áreas desérticas y un clima cálido y seco, condiciones que influyen de manera significativa en la disponibilidad de recursos hídricos, la fertilidad de los suelos y el manejo de los sistemas de producción agrícola (Banco Central de Reserva del Perú, 2022).

En los ecosistemas áridos —como los presentes en la región Ica—, la degradación de los suelos constituye una de las principales limitantes para la producción agrícola, siendo la salinización uno de los procesos más frecuentes debido a las condiciones naturales del entorno (Sakadevan y Nguyen, 2010). Esta problemática puede intensificarse por prácticas inadecuadas de manejo del agua de riego y por el uso excesivo de fertilizantes sintéticos (Mukhopadhyay et al., 2021). Además, los suelos de estas zonas suelen presentar bajos contenidos de materia orgánica, limitada fertilidad natural y valores elevados de pH (Hag Husein et al., 2021). Por estas razones, resulta fundamental promover la adopción de herramientas y estrategias de agricultura de precisión que contribuyan a optimizar el uso de los recursos, mejorar la productividad de los cultivos y garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en el largo plazo.

El monitoreo sistemático de la fertilidad del suelo constituye un componente esencial para la gestión sostenible de la producción agrícola. La integración de herramientas de agricultura de precisión, análisis de suelos, técnicas geoestadísticas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite caracterizar y modelar la variabilidad espacial de los nutrientes mediante métodos como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de semivariogramas. La información generada a partir de estas herramientas facilita la delimitación de zonas de manejo específicas y el diseño de estrategias de fertilización diferenciada, optimizando la eficiencia en el uso de insumos, reduciendo costos de producción y contribuyendo a la conservación de la calidad y productividad del suelo en el largo plazo (Culman et al., 2021; Chineá-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este contexto, el presente manual tiene como objetivo estudiar la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo de la EEA Chíncha mediante la evaluación e interpretación de sus propiedades fisicoquímicas y la aplicación de herramientas de análisis espacial. Como resultado, se elaboran mapas temáticos de fertilidad que permiten identificar áreas con características homogéneas, proporcionando una base técnica para formular recomendaciones orientadas a un manejo más eficiente del suelo y de la fertilización.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

La formulación de recomendaciones de fertilización a partir del análisis químico del suelo comprende una serie de etapas relacionadas entre sí. Entre ellas se encuentran la toma de muestras de suelo, los análisis de laboratorio, la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos y, finalmente, la definición de las recomendaciones para el manejo nutricional del cultivo. Aunque los métodos empleados en cada etapa pueden influir en la recomendación final, las diferencias observadas entre laboratorios de una misma región suelen estar asociadas principalmente a los criterios y enfoques utilizados para interpretar los resultados analíticos (Quispe-Matos et al., 2025).

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El índice de saturación de bases catiónicas (BCSR) es una forma de evaluar la fertilidad del suelo considerando el equilibrio de nutrientes importantes como calcio, magnesio, potasio y sodio. Estos nutrientes se encuentran retenidos en el suelo y están disponibles para las plantas. Cuando existe un buen balance entre ellos, el cultivo puede desarrollarse mejor y aprovechar de manera más eficiente los nutrientes presentes en el terreno (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y utilizada actualmente en la agricultura, señala que debe existir un equilibrio adecuado entre nutrientes, como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), para favorecer un mejor crecimiento y mayor producción de los cultivos (Yang et al., 2024). Asimismo, diferentes estudios indican que estas proporciones pueden variar según el tipo de suelo y las necesidades nutricionales de cada cultivo (Kopittke y Menzies, 2007). Sin embargo, investigaciones recientes mencionan que no todos los suelos responden de la misma manera a este enfoque. En algunos casos, resulta más importante asegurar que el cultivo tenga suficiente disponibilidad de nutrientes, más que mantener una proporción exacta entre ellos (Brock et al., 2021).

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El enfoque BCSR se desarrolló a partir de los estudios realizados por William Albrecht durante la década de 1930, en los que analizó cómo el equilibrio de los cationes básicos presentes en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo influía en el rendimiento de los cultivos (Culman et al., 2021). A partir de investigaciones efectuadas en suelos agrícolas de Misuri, Albrecht planteó que una adecuada relación entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) favorece mejores condiciones físicas del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes y promueve un adecuado crecimiento de las raíces (Chaganti y Culman, 2017). De acuerdo con esta teoría, cuando las proporciones entre los cationes se alejan de determinados rangos considerados adecuados, puede verse afectada la absorción de nutrientes por las plantas. Esto ocurre porque el desequilibrio iónico modifica los procesos que controlan la disponibilidad y reactividad de los nutrientes en el suelo. En este contexto, la solución del suelo representa solo una pequeña parte de los nutrientes totales requeridos por los cultivos, mientras que los distintos componentes del suelo funcionan como reservorios capaces de liberar o retener iones según las condiciones del sistema (Quispe-Matos et al., 2025). Los mecanismos que regulan el equilibrio iónico en la solución suelo se pueden observar en la Figura 1.

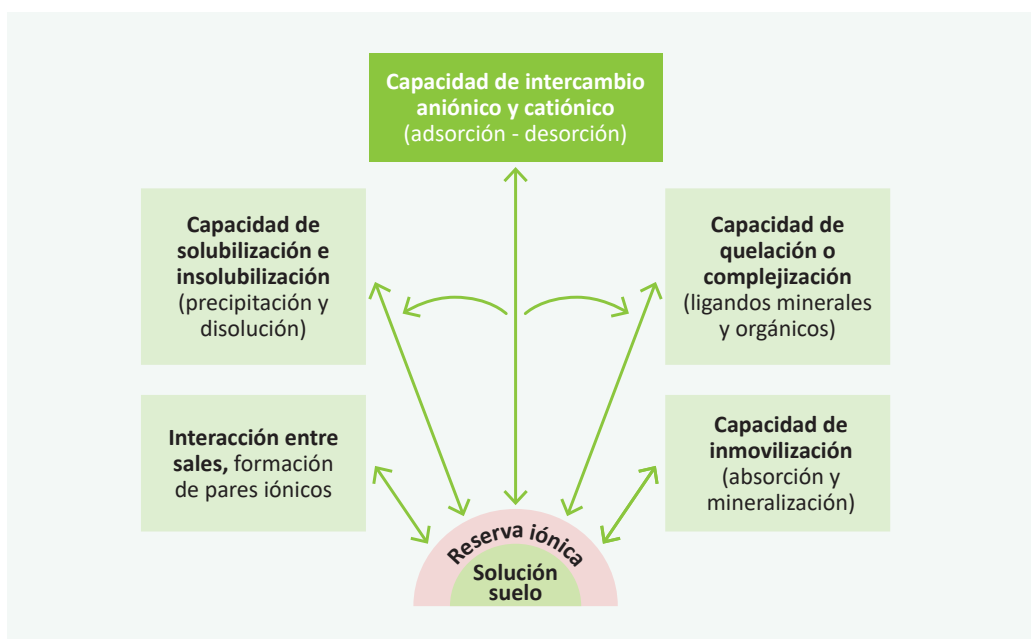


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Las investigaciones desarrolladas por Bear et al. (1945) en suelos agrícolas de Nueva Jersey aportaron resultados que respaldaron parcialmente los planteamientos propuestos por Albrecht sobre el equilibrio catiónico del suelo. Estos estudios, posteriormente complementados por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), sugirieron que, en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), la distribución ideal de bases intercambiables debería encontrarse en rangos aproximados de 65–75 % de calcio (Ca^{2+}), 10–15 % de magnesio (Mg^{2+}), 3–7 % de potasio (K^+) y menos de 5 % de sodio (Na^+). Asimismo, se indicó que los niveles de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) debían mantenerse por debajo de 15 % para reducir problemas de toxicidad asociados a suelos ácidos. Con base en estos criterios, el modelo BCSR comenzó a utilizarse como referencia para el manejo de fertilización y corrección de suelos (Zhang, 1999).

En años recientes, diversos estudios han evaluado el desempeño del enfoque BCSR frente al sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), encontrando que, en muchos casos, la cantidad disponible de nutrientes en el suelo explica mejor el rendimiento de los cultivos que las relaciones entre cationes (Brock et al., 2021). No obstante, el enfoque BCSR continúa siendo útil en suelos con alta CIC ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, elevada lixiviación o marcados desequilibrios de bases, donde puede contribuir al diagnóstico y corrección de problemas de fertilidad (Quispe-Matos et al., 2025).

Por otro lado, el pH del suelo constituye un indicador fundamental para la toma de decisiones agronómicas, dado que permite identificar posibles desequilibrios químicos y definir la necesidad de aplicar enmiendas como cal o yeso agrícola. La cal se emplea principalmente para disminuir problemas asociados a la acidez y toxicidad por aluminio (Al^{3+}), mientras que el yeso agrícola ayuda a reducir los efectos del exceso de sodio (Na^+). Ambos materiales aportan calcio (Ca^{2+}), favoreciendo el incremento de su saturación en el suelo y contribuyendo a disminuir la presencia relativa de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} (Figura 2). Además, la aplicación de cal y yeso puede modificar las propiedades químicas del suelo y la respuesta de los cultivos mediante procesos relacionados con el aumento del pH, el aporte de calcio y la incorporación de azufre (S) (Espinosa y Molina, 1999).

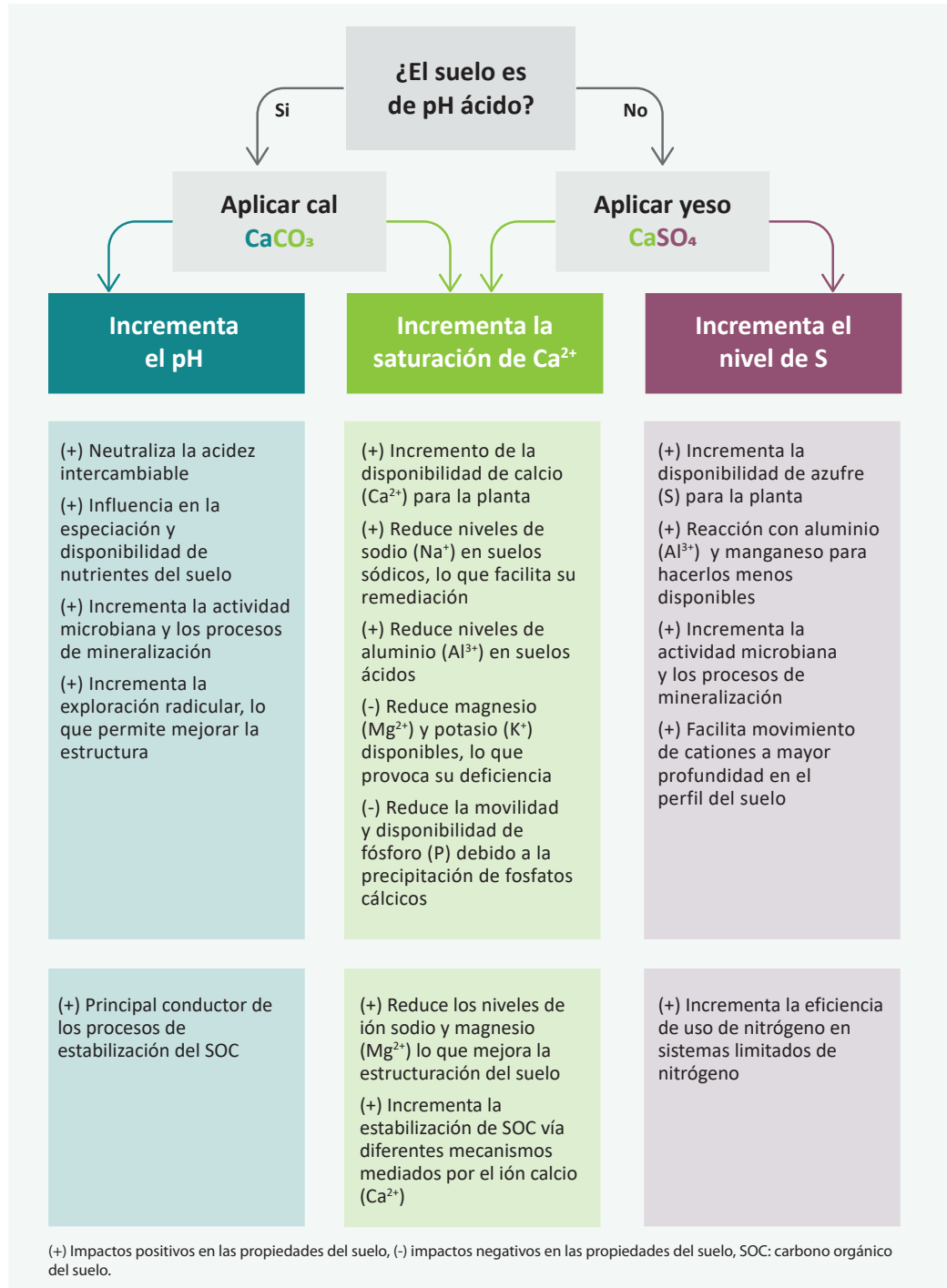


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

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). Aunque este modelo posee una base científica ampliamente aceptada, también ha sido objeto de críticas debido a que no incorpora de manera directa las interacciones entre nutrientes ni las limitaciones físicas y estructurales del suelo. A pesar de las limitaciones, el SLAN continúa siendo una herramienta esencial para la evaluación e interpretación de análisis de suelos. Su aplicación en el diagnóstico de la fertilidad comprende tres etapas principales: correlación, calibración e interpretación de los resultados de los análisis de suelos (Quispe-Matos et al., 2025), las cuales se presentan en la Figura 3.

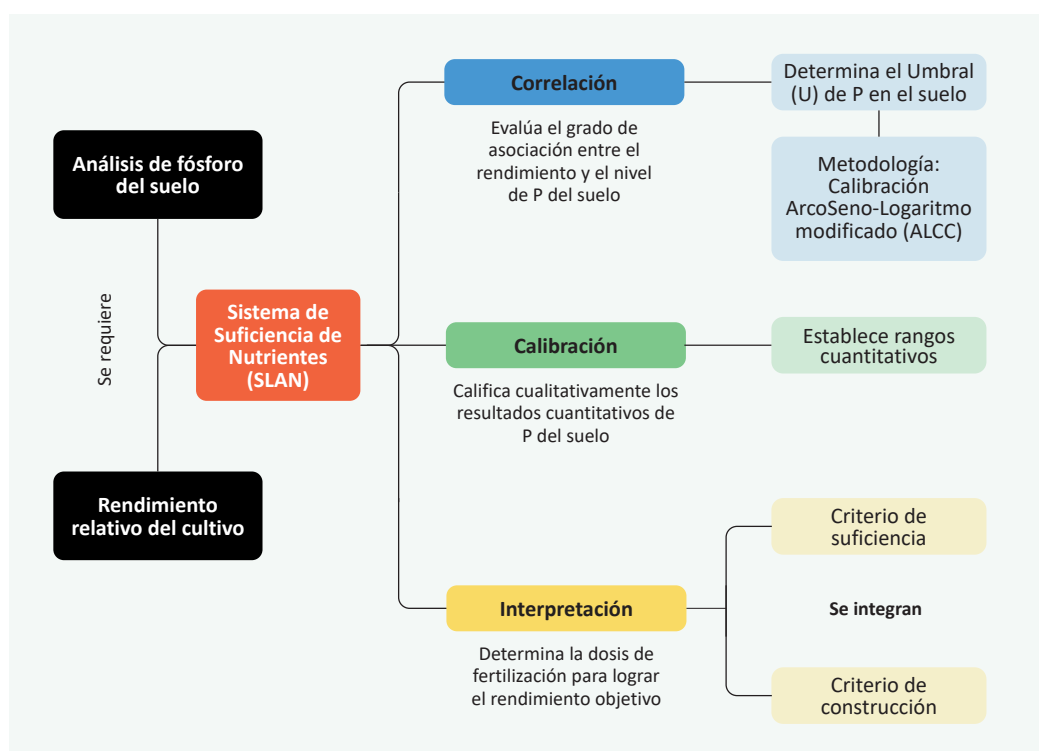


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

Para los cálculos de la interpretación de resultados de los análisis de suelos, se puede hacer uso de tres 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 solo 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.

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

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 vid, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de vid, y se obtuvo 15 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 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 31 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 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 31 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 24,8 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 24,8 t ha⁻¹ en lugar de 31 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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 24,8 \text{ t ha}^{-1} = 8,68 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 24,8 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 8,68 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 24,8 \text{ t ha}^{-1} + 8,68 \text{ t ha}^{-1} = 33,48 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 33,48 \text{ t ha}^{-1} = 20,09 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 20,09 kg de P para alcanzar un rendimiento objetivo de 33,48 t ha⁻¹, el cual está conformado por 8,68 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 24,8 t ha⁻¹ 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 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 al criterio de construcción, este se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo, con el objetivo de incrementar progresivamente su concentración 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 vid 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 suelos en un cultivo de vid, y se obtuvo 10 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 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 31 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 60 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 31 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 18,6 \text{ t ha}^{-1}$$

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 35 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 18,6 \text{ t ha}^{-1} = 6,51 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 18,6 \text{ t ha}^{-1} + 6,51 \text{ t ha}^{-1} = 25,11 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 25,11 \text{ t ha}^{-1} = 15,07 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

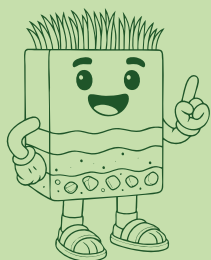
$$\text{RM de P} = \frac{15,07 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 50,23 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de vid es 50,23 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de vid, y se obtuvo 5 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 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 31 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 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 5 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 31 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 9,3 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 9,3 \text{ t ha}^{-1} = 3,25 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9,3 \text{ t ha}^{-1} + 3,25 \text{ t ha}^{-1} = 12,55 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12,55 \text{ t ha}^{-1} = 7,53 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{7,53 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,2} = 37,65 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

$$RC = 1,5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

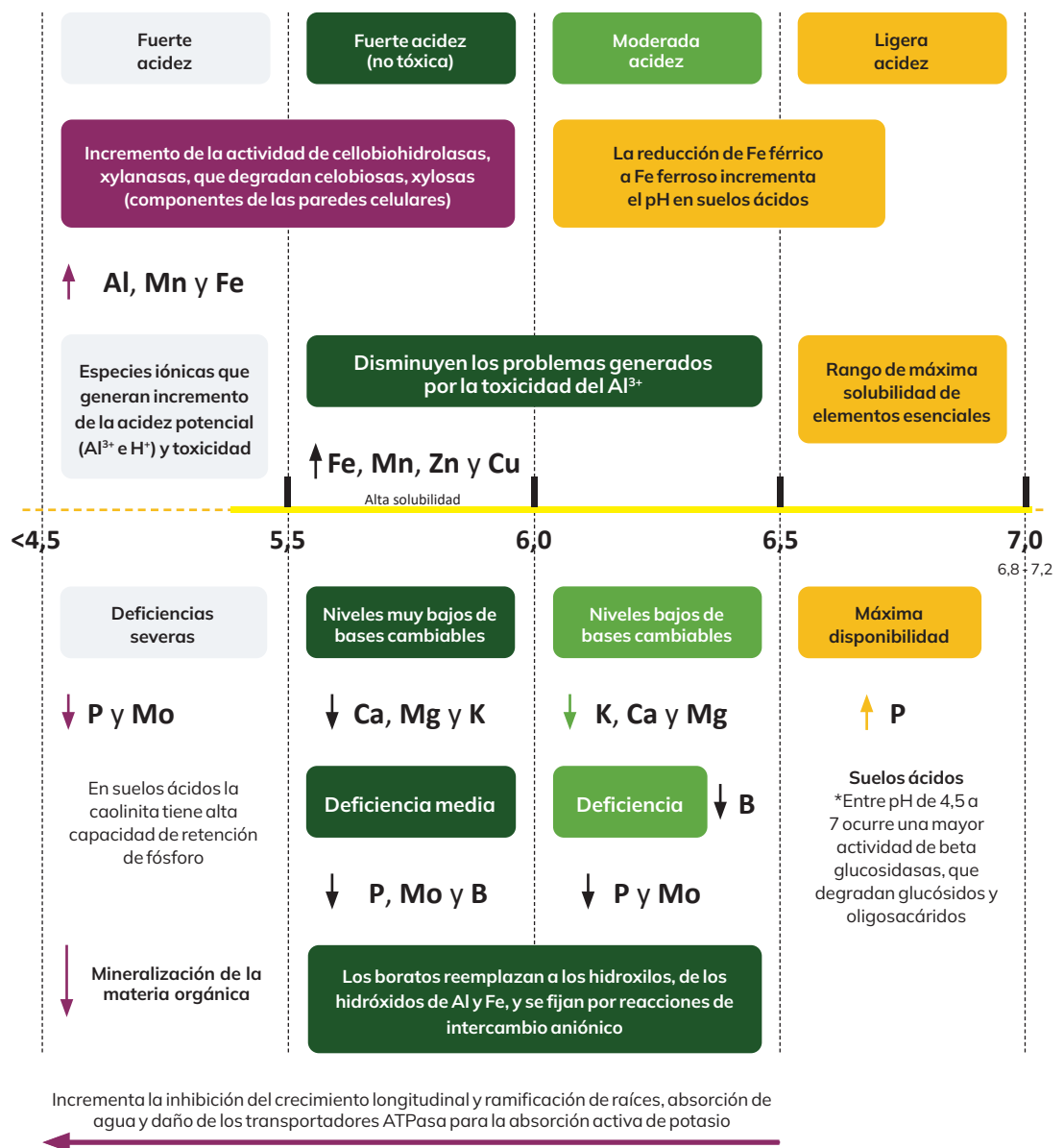
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 37,65 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 51,15 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de vid es 51,15 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 a 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).



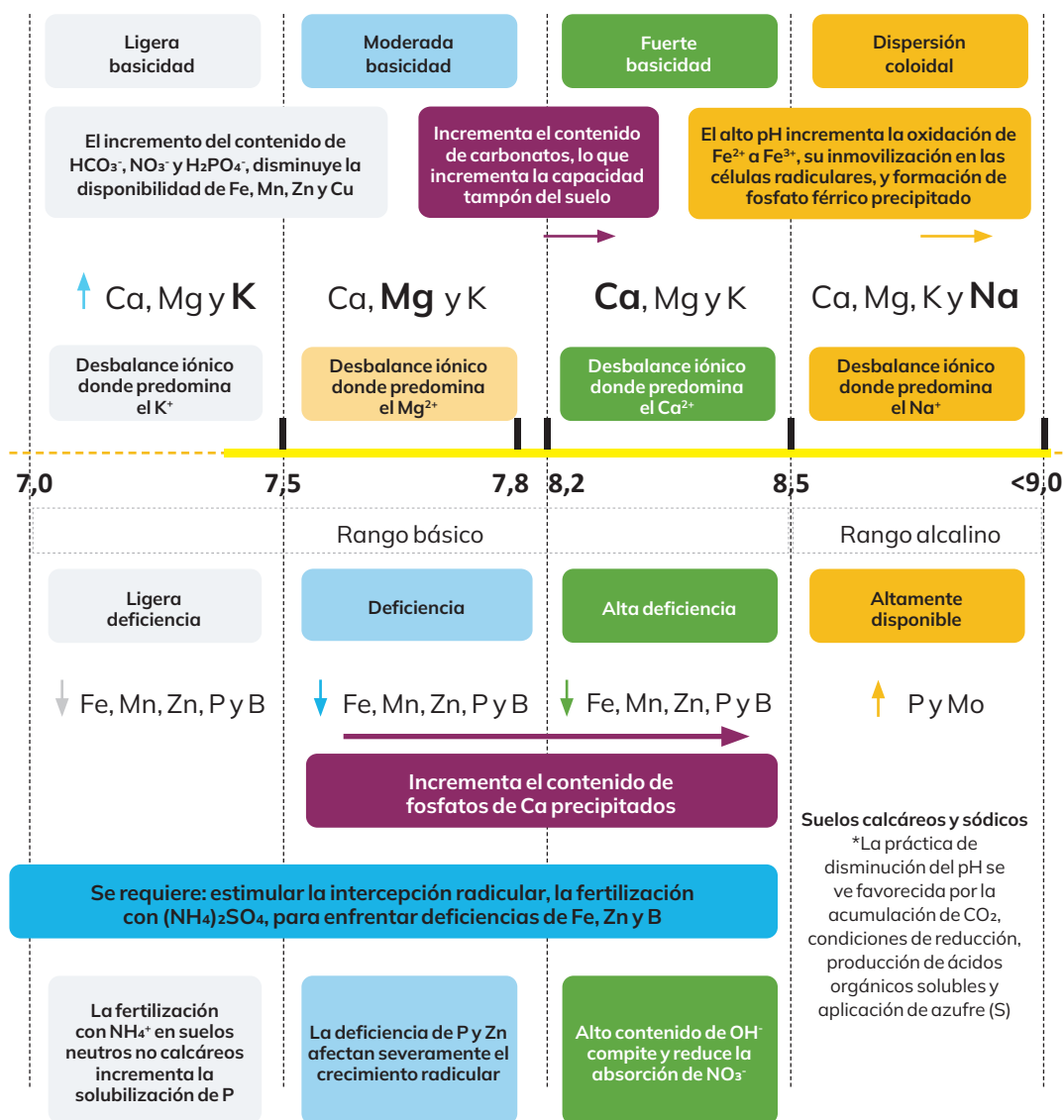


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 teóricos de semivariograma (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 Chincha

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental San Juan de Condor, perteneciente a la EEA Chincha, ubicado en el distrito de Independencia, provincia de Pisco, departamento de Ica (Figura 5), con una extensión de 69,3 ha y a 211 m s. n. m. (Cruz-Luis et al., 2025).

La EEA Chincha se encuentra en suelos de tipo Fluvisol éutrico - Regosol éutrico. Estos se han desarrollado a partir de sedimentos fluviales recientes, por lo que tiene una disposición morfológica estratificada de horizontes o capas (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Además, en la estación se realizan trabajos de investigación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios a los agricultores de la región Ica. Los cultivos priorizados para estas actividades son: frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), pallar (), maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) y vid (*Vitis vinifera* L.) (Cruz-Luis et al., 2025).

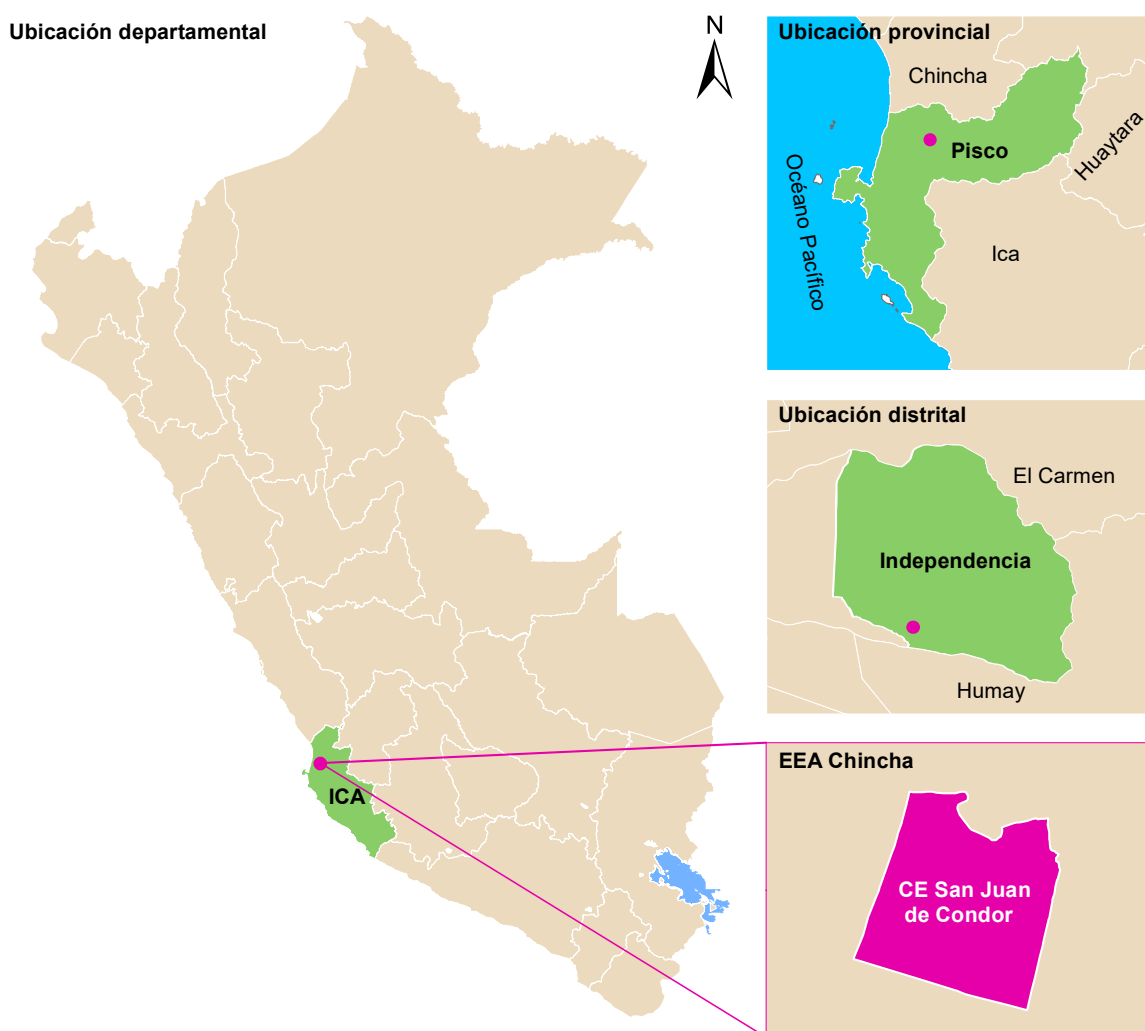


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental San Juan de Condor

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

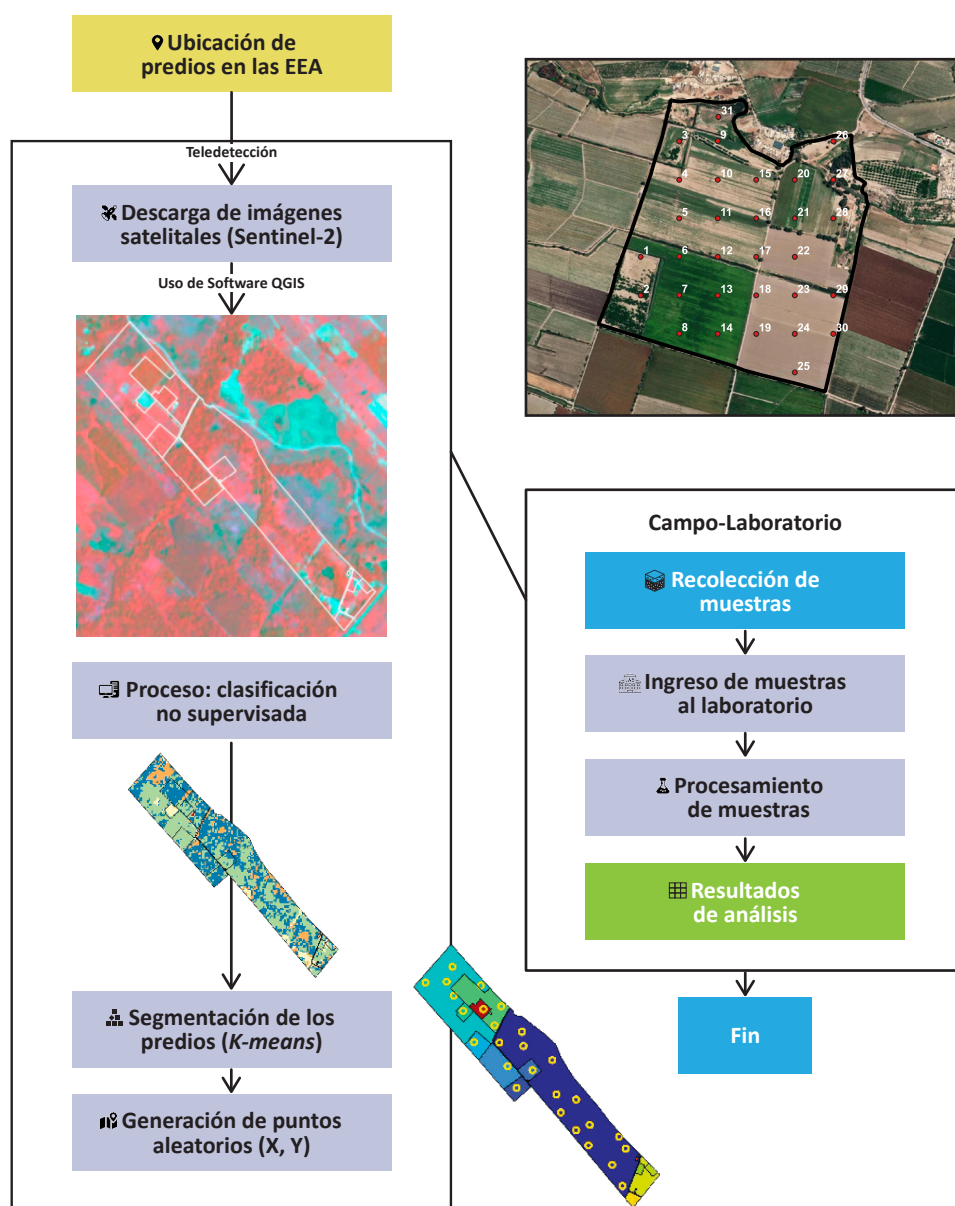


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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 31 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

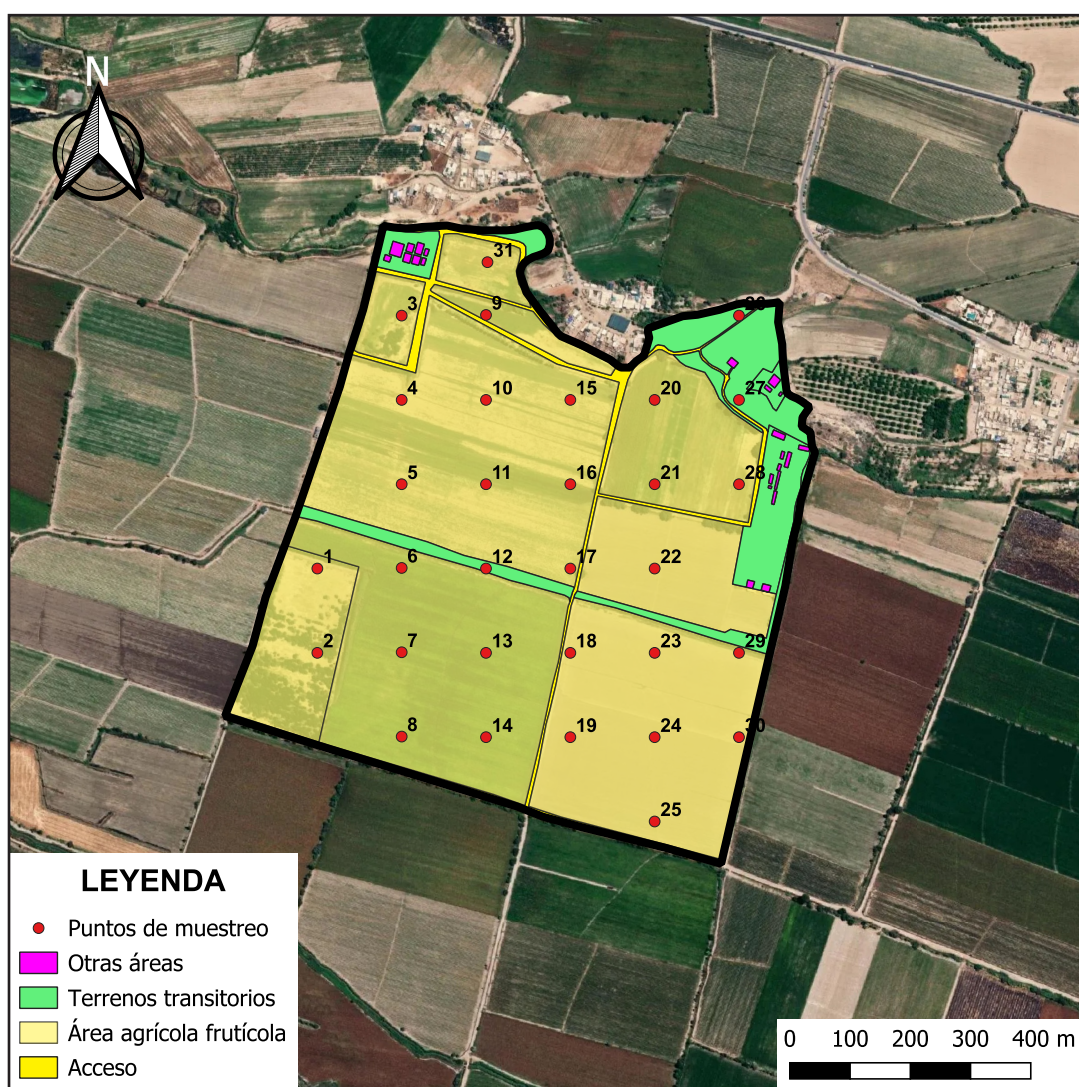


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Chincha

3.2.2. Muestreo del suelo en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 31 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 aproximadamente 30 cm de profundidad y 20 × 20 cm de área.
- 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 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, 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 Chíncha 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 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

En los resultados del análisis fisicoquímico de la EEA Chíncha se observa, en promedio, una textura franco-arenosa (51,64 % arena, 31,90 % limo y 16,46 % de arcilla), con coeficientes de variación entre 21,11 % y 40,92 %, indicando una variabilidad baja a moderada en las fracciones texturales. La distribución es heterogénea en las fracciones finas.

El pH presenta un valor promedio de $8,26 \pm 0,33$, clasificado como una reacción moderadamente alcalina, con baja variabilidad ($CV = 4,05 \%$), con un rango de 7,8 (ligeramente alcalino) a 8,9 (fuertemente alcalino). Esta condición es coherente con las características de altas temperaturas y baja precipitación, donde también se favorece la acumulación de carbonatos (CaCO_3 promedio $3,58 \pm 1,29$; $CV = 35,96 \%$) y alto contenido de bases intercambiables.

La conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) presenta un valor promedio de $20,2 \text{ dS m}^{-1}$, con una variabilidad muy alta ($CV = 192,31 \%$), evidenciando la presencia de zonas con acumulación de sales, propias del ambiente característico de Chíncha, donde la evapotranspiración supera ampliamente a la precipitación y se favorece la salinización del suelo.

El contenido de materia orgánica del suelo (MO) es moderado ($3,36 \pm 1,29$; $CV = 38,24 \%$) y coincide con valores de carbono orgánico (1,95 %) y carbono total (2,54 %) de variabilidad similar. En base a esto, la fertilidad orgánica es aceptable, pero heterogénea, lo que sugiere un manejo diferenciado, aporte de residuos y cobertura vegetal en algunas zonas con bajo contenido de materia orgánica.

Respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo disponible presenta un valor promedio de $15,6 \text{ mg kg}^{-1} \pm 18,11$ ($CV = 116,1 \%$), mientras que el potasio disponible alcanza $674,86 \text{ mg kg}^{-1} \pm 490,53$ ($CV = 72,69 \%$). Esta alta variabilidad indica la presencia de zonas muy enriquecidas y otras con niveles más bajos, posiblemente asociadas a aplicaciones localizadas de fertilizantes, diferencias en la textura y en la capacidad de intercambio catiónico.

En conjunto, los suelos de la EEA Chíncha se caracterizan por textura franco-arenosa, pH ligero a fuertemente alcalino, presencia de salinidad elevada en sectores específicos y contenido moderado de materia orgánica, con alta variabilidad espacial en fósforo, potasio y en el complejo de intercambio catiónico. Estas condiciones requieren un manejo específico por zonas, orientado a la identificación y corrección de zonas salinas, al aprovechamiento de la fertilidad orgánica y a una fertilización balanceada y localizada, que considere la alta heterogeneidad de los nutrientes.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV (%)	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
pH	und	8,26	0,33	4,05	8,2	7,8	8,9	0,44
CEe	dS m ⁻¹	20,2	38,85	192,31	7,17	0,08	181,36	3,2
MO	%	3,36	1,29	38,24	3,25	1,85	6,67	0,83
P disp.	mg kg ⁻¹	15,6	18,11	116,1	9,73	3,44	97,38	3,55
K disp.	mg kg ⁻¹	674,86	490,53	72,69	478,59	119,05	1940,79	1,03
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	31,28	18,02	57,62	25,12	10,52	73,21	1,1
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	1,7	0,93	54,58	1,33	0,63	4,25	1,15
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	8,7	11,4	131,16	5,18	0,79	54,39	3,05
K ⁺	cmol kg ⁻¹	1,73	1,26	72,91	1,22	0,31	4,97	1,03
CaCO ₃	%	3,58	1,29	35,96	3,59	0,2	7,05	-0,11
C org.	%	1,95	0,75	38,25	1,89	1,07	3,88	0,83
C total	%	2,54	0,97	38,25	2,46	1,39	5,04	0,83
N total	%	0,35	0,10	29,09	0,37	0,20	0,54	0,20
Arena	%	51,64	10,9	21,11	50,35	32,39	78,1	0,54
Arcilla	%	16,46	6,74	40,92	17,8	3,41	27,05	-0,42
Limo	%	31,9	11,67	36,57	30,9	13,86	64,21	0,84
CIce	cmol kg ⁻¹	43,4	25,68	59,16	34,54	12,96	98,72	0,83
PCI	%	75,43	11,53	15,29	79,31	36,65	85,65	-2,29
PMI	%	4,39	1,68	38,28	3,85	2,03	11,32	2,46
PPI	%	4,24	2,58	60,83	3,56	1,39	14,52	2,54
PSI	%	15,93	12,12	76,09	12,23	1,71	55,1	2,09

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, C org.: carbono orgánico, 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

3.5. 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.

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

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 del suelo

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3. En general, los modelos de semivariograma muestran errores de predicción (RMSE) relativamente bajos y coeficientes de determinación bajos (R^2), lo que indica un ajuste limitado entre los valores observados y los valores predichos y una capacidad predictiva espacial moderada a baja para la mayoría de las propiedades del suelo.

Las fracciones texturales arena y limo ajustadas con modelos lineales presentan bajos valores de RMSE (9,83 y 9,67, respectivamente) y R^2 muy bajos (0,16 y 0,08, respectivamente), lo que refleja que, aunque se reconoce una estructura espacial, la predicción puntual en sitios no muestreados es poco precisa. En el caso de la arcilla, ajustada con modelo exponencial, también presenta un R^2 muy bajo, evidenciando una estructura espacial débil y una alta influencia de procesos locales.

El pH, ajustado con un modelo gaussiano, muestra un RMSE de 0,34 y un R^2 de 0,01, lo que sugiere que la capacidad de los modelos para reproducir la variación espacial de esta propiedad es limitada. En el caso de la conductividad eléctrica, ajustado con modelo lineal presenta un RMSE elevado de 25,80 y un R^2 de 0,001, prácticamente nulo, indicando alta variabilidad local y escasa predictibilidad espacial, probablemente asociada a la distribución muy heterogénea de las sales.

En los indicadores de carbono, el carbono orgánico (modelo exponencial) y el carbono total (modelo *linear to sill*) presentaron rangos muy pequeños (0,002 m), valores de RMSE de 6,79 y 9,04, respectivamente, y R^2 cercanos a cero. Estos resultados indican una estructura espacial débil y una elevada variabilidad a corta distancia, lo que dificulta su interpolación y reduce la precisión de las predicciones espaciales. De manera similar, la materia orgánica (modelo exponencial) y el nitrógeno total (modelo lineal) muestran RMSE de 11,69 y 0,99 % y R^2 de 0,00 y 0,04, respectivamente, confirmando que son variables con alta variabilidad local y baja capacidad de predicción espacial.

Respecto a los nutrientes, el fósforo disponible, ajustado con un modelo esférico, presenta un RMSE de 9,97 y R^2 de 0,07, mientras que el potasio disponible, con modelo lineal, muestra un RMSE muy elevado de 453,40 y R^2 de 0,07. Estos resultados indican que, aunque se identifican ciertos patrones de continuidad espacial, la precisión de la predicción puntual para estos nutrientes es limitada.

En el complejo de intercambio catiónico, el CICE, calcio, potasio, magnesio y sodio intercambiable presentan RMSE entre 0,84 y 23,27 y R^2 muy bajos entre 0,008 y 0,11, lo que indica que su variación está dominada por procesos muy locales.

Los porcentajes de cationes intercambiables (PCI, PMI, PPI, PSI) presentan modelos esféricos o *linear to sill* con RMSE entre 1,30 y 7,34 y R^2 menores a 0,06, lo cual evidencia que la distribución espacial de las proporciones de los cationes intercambiables es altamente heterogénea y difícil de predecir con los modelos utilizados.

En conjunto, los resultados geoestadísticos muestran que los suelos de la EEA Chíncha presentan una organización espacial muy variable según la propiedad medida y una predictibilidad espacial generalmente baja.

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

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	Linear	54,618	118,533	352,895	9,825	0,164
Limo	Linear	57,829	102,257	346,270	9,673	0,081
Arcilla	Exponential	43,985	42,029	180,028	6,689	0,020
pH	Gaussian	0,017	0,111	72,987	0,338	0,005
CEe	Linear	193,281	480,173	433,609	25,802	0,001
C org.	Exponential	24,429	61,795	0,002	6,795	0,000
C total	Linear to Sill	0,000	104,197	0,002	9,036	0,002
CaCO ₃	Gaussian	2,668	0,859	42,094	1,075	0,027
ClCe	Linear to Sill	491,280	551,508	445,000	23,561	0,068
MO	Exponential	0,001	182,803	0,002	11,694	0,000
N total	Linear	1,106	1,255	571,520	0,989	0,038
P disp.	Spherical	6,862	91,650	421,203	9,973	0,070
K disp.	Linear	154,150	233,350	491,050	453,400	0,067
K ⁺	Linear	0,776	1,114	299,681	1,094	0,064
Ca ²⁺	Gaussian	17,356	329,770	326,488	23,276	0,015
Mg ²⁺	Exponential	0,320	0,620	11,239	0,840	0,008
Na ⁺	Exponential	3,168	22,348	22,348	4,215	0,111
PCI	Spherical	21,848	41,894	330,255	6,369	0,058
PMI	Linear to Sill	0,503	1,599	570,397	1,302	0,010
PPI	Linear to Sill	0,753	4,899	569,300	1,927	0,027
PSI	Linear to Sill	46,038	57,114	571,326	7,340	0,006

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, C org.: carbono orgánico, ClCe: 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 Chíncha (Figuras 9–29) muestran patrones espaciales contrastantes entre las propiedades físicas y químicas del suelo, pero su capacidad de representar con precisión esas variaciones depende del ajuste geoestadístico alcanzado por cada variable.

Para la textura se distinguen cinco zonas según los intervalos definidos en la leyenda. En el mapa de arena, la zona 1 (32,39–44,00 %) agrupa los sectores con menor contenido de fracción gruesa, seguida por la zona 2 (44,00–48,00 %), la zona 3 (48,00–52,00 %), la zona 4 (52,00–56,00 %) y la zona 5 (56,00–78,10 %), que concentra las áreas con mayor proporción de arena. De la misma manera, en el mapa de limo se definen la zona 1 (13,86–29,00%), zona 2 (29,00–33,00 %), zona 3 (33,00–37,00 %), zona 4 (37,00–41,00%) y zona 5 (41,00–64,21 %), mientras que en el mapa de arcilla las zonas se distribuyen en zona 1 (3,41–16,00 %), zona 2 (16,00–17,00 %), zona 3 (17,00–18,00 %), zona 4 (18,00–19,00 %) y zona 5 (19,00–27,05 %).

En la conductividad eléctrica (CE), la zona 1 (0,08–6,00 dS m⁻¹) representa suelos con baja a moderada salinidad aparente, mientras que en la zona 2 (6,00–12,00 dS m⁻¹), zona 3 (12,00–18,00 dS m⁻¹), zona 4 (18,00–24,00 dS m⁻¹) y zona 5 (24,00–181,36 dS m⁻¹) concentran los sectores que son desde moderado a fuertemente salino.

Los mapas de materia orgánica y nitrógeno total también se estructuran en cinco zonas. En materia orgánica, la zona 1 (1,85–3,20 %), zona 2 (3,20–3,40 %), zona 3 (3,40–3,60 %), zona 4 (3,60–3,80 %) y zona 5 (3,80–6,67 %) reflejan un gradiente desde contenidos moderados hasta altos, en relación con la media de 3,36 %. Para nitrógeno total, las cinco zonas muestran variaciones estrechas alrededor de la media de 0,35 %.

En el mapa de fósforo disponible (P disp.), la zona 1 (3,44–7,00 mg kg⁻¹) agrupa áreas de baja disponibilidad; la zona 2 (7,00–9,00 mg kg⁻¹), zona 3 (9,00–11,00 mg kg⁻¹) y zona 4 (11,00–13,00 mg kg⁻¹) tienen una disponibilidad intermedia; y la zona 5 (13,00–97,38 mg kg⁻¹) concentran los valores altos. En potasio disponible (K disp.), la zona 1 (119,05–380,00 mg kg⁻¹) tiene un contenido medio a alto, y la zona 2 (380,00–560,00 mg kg⁻¹), zona 3 (560,00–740,00 mg kg⁻¹), zona 4 (740,00–920,00 mg kg⁻¹) y zona 5 (920,00–1940,79 mg kg⁻¹) tienen un contenido alto a muy alto.

Los mapas del complejo de intercambio catiónico también se subdividen en cinco zonas de acuerdo con la leyenda. Para calcio intercambiable, la zona 1 (10,52–21,00 cmol kg⁻¹) indica un contenido relativamente bajo, la zona 2 (21,00–27,00 cmol kg⁻¹) y la zona 3 (27,00–33,00 cmol kg⁻¹) corresponden a niveles intermedios, y las zonas 4 (33,00–39,00 cmol kg⁻¹) y 5 (39,00–73,21 cmol kg⁻¹) reflejan sectores con alto contenido de Ca. En magnesio, la zona 1 (0,63–1,32 cmol kg⁻¹), zona 2 (1,32–1,44 cmol kg⁻¹), zona 3 (1,44–1,56 cmol kg⁻¹), zona 4 (1,56–1,68 cmol kg⁻¹) y zona 5 (1,68–4,25 cmol kg⁻¹) evidencian una variación estrecha, pero con zonas de mayor acumulación. El sodio intercambiable se organiza en zona 1 (0,79–3,40 cmol kg⁻¹), zona 2 (3,40–6,80 cmol kg⁻¹), zona 3 (6,80–10,20 cmol kg⁻¹), zona 4 (10,20–13,60 cmol kg⁻¹) y zona 5 (13,60–54,39 cmol kg⁻¹), lo que permite identificar áreas con suelos sódicos. En potasio intercambiable, la zona 1 (0,31–0,80 cmol kg⁻¹), zona 2 (0,80–1,60 cmol kg⁻¹), zona 3 (1,60–2,40 cmol kg⁻¹), zona 4 (2,40–3,20 cmol kg⁻¹) y zona 5 (3,20–4,97 cmol kg⁻¹) reflejan la reserva de K en el complejo de intercambio.

En el mapa de carbonatos (CaCO_3), la zona 1 (0,20–3,20 %), zona 2 (3,20–3,40 %), zona 3 (3,40–3,60 %), zona 4 (3,60–3,80 %) y zona 5 (3,80–7,05 %) indican un aumento progresivo en el contenido de carbonatos, explicando la condición alcalina general de estos suelos. Los mapas de carbono orgánico (C org.) y carbono total (C total) muestran zonas desde valores bajos (C org.: 1,07–1,88 % y C total: 1,39–2,39 %) hasta valores altos (C org.: 2,12–3,88 % y C total: 2,81–5,04 %), permitiendo observar gradientes de acumulación de carbono ligados a la materia orgánica.

Finalmente, los mapas del porcentaje de calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables (PCI, PMI, PPI y PSI) reflejan la proporción de cada catión en el complejo de intercambio, indicando posibles desequilibrios en la saturación de bases.

En conjunto, y dado que los coeficientes de determinación son muy bajos, la división de cada mapa en zonas debe interpretarse principalmente como una herramienta orientativa, más que como una representación precisa para la toma de decisiones. En este sentido, su utilidad radica en identificar gradientes y tendencias espaciales de las propiedades fisicoquímicas del suelo dentro de la EEA Chíncha y en apoyar la planificación de muestreos más detallados, en lugar de emplearse directamente para la implementación de intervenciones específicas en campo.

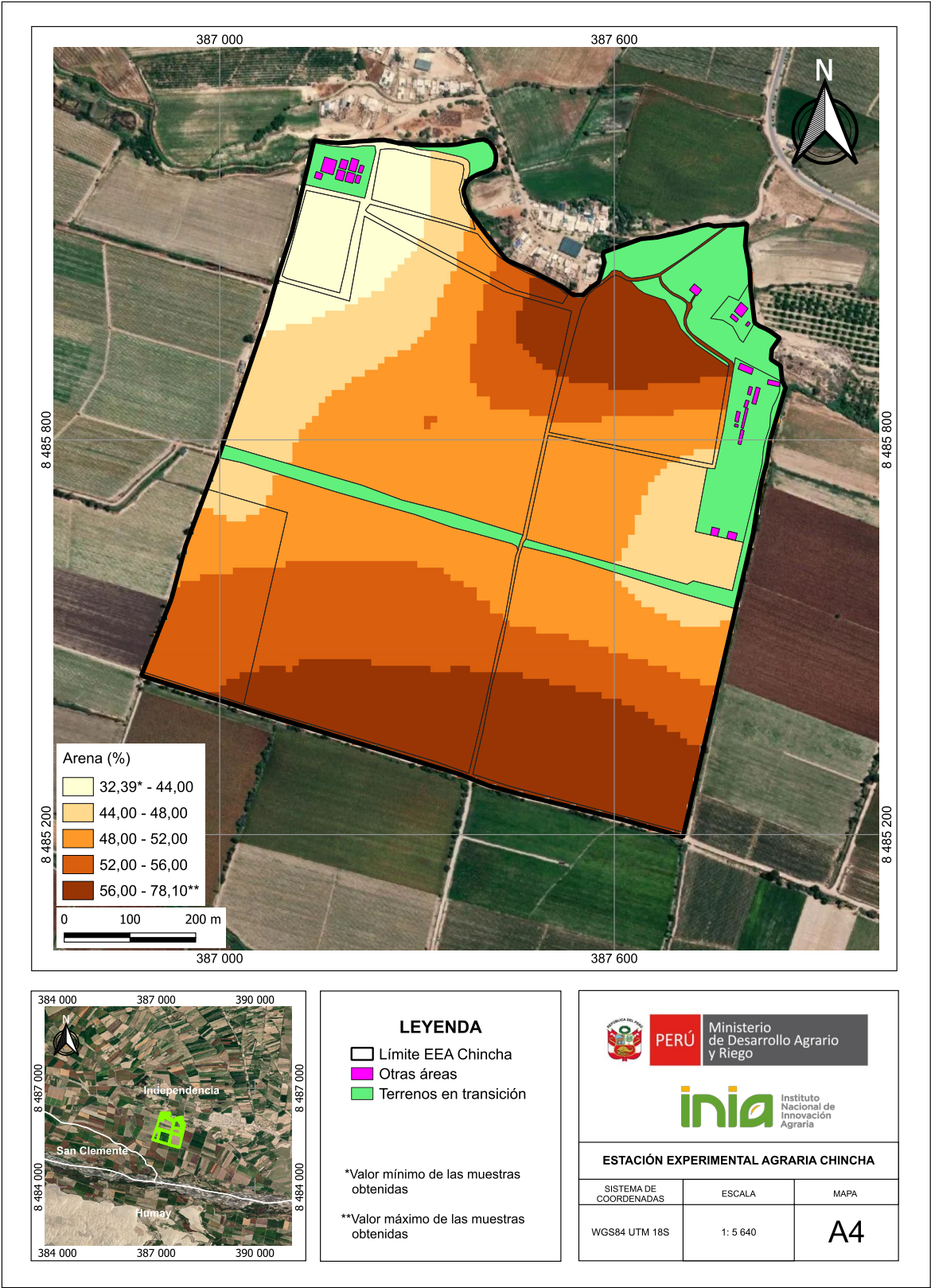


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

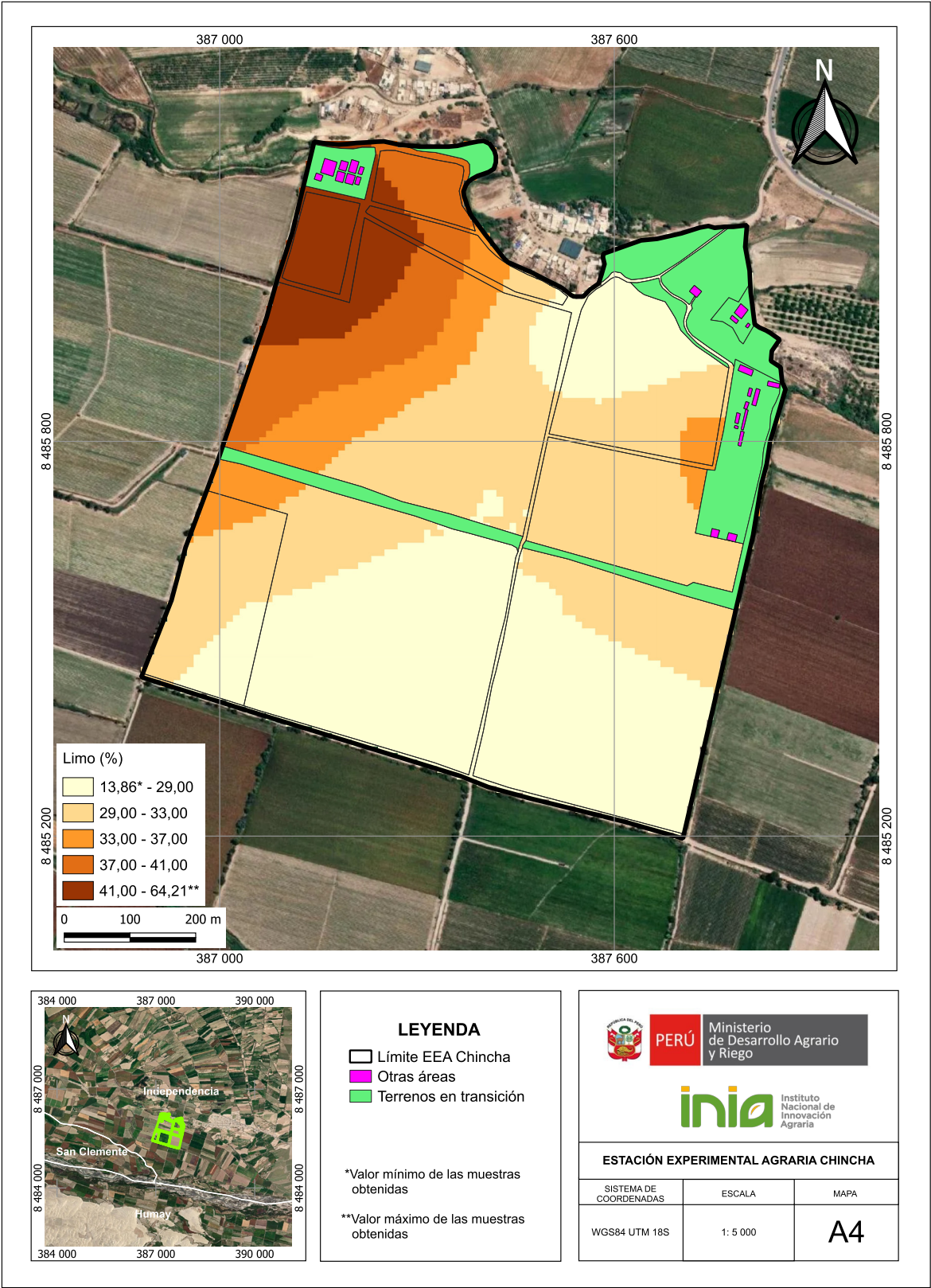


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

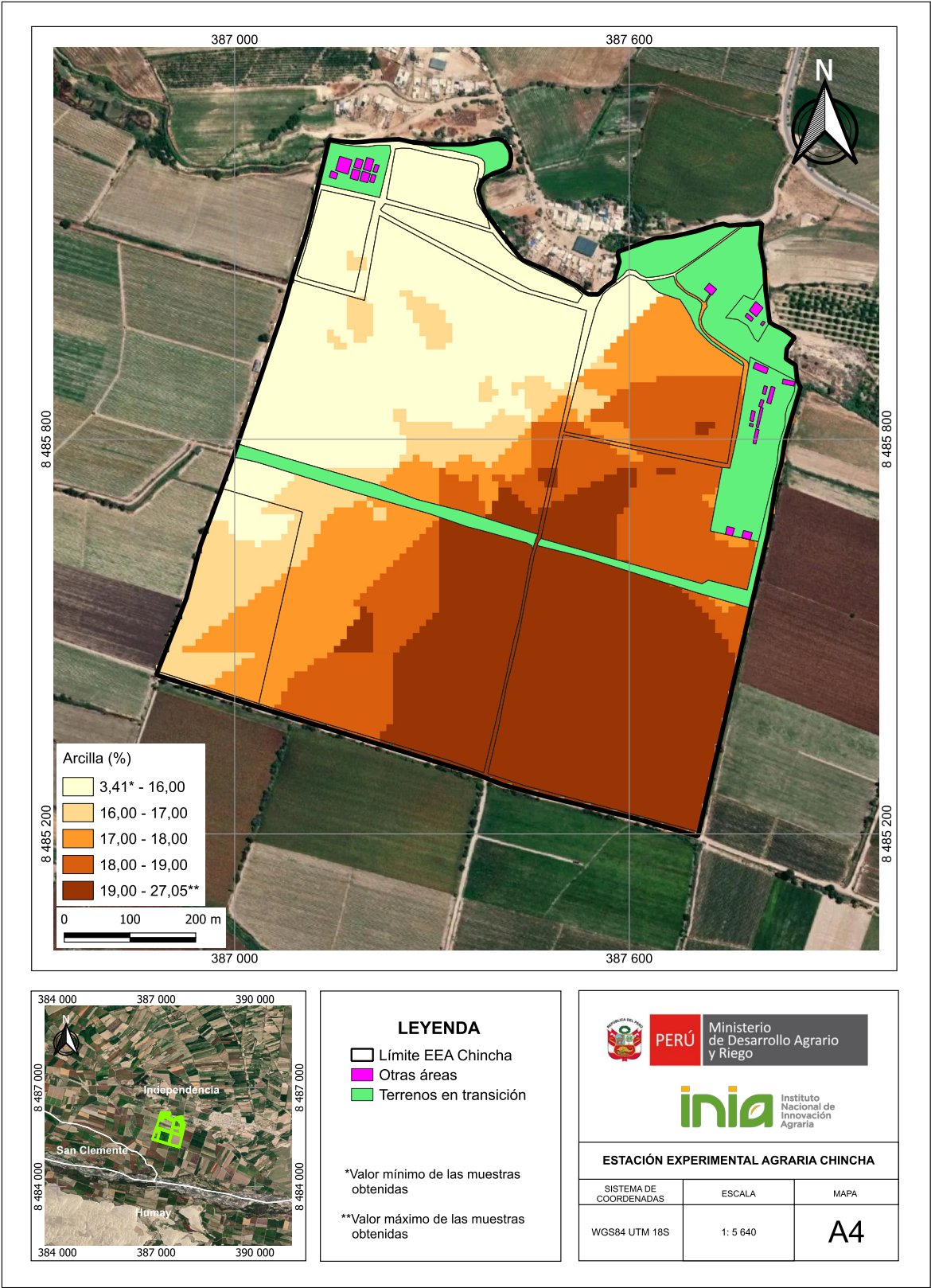


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

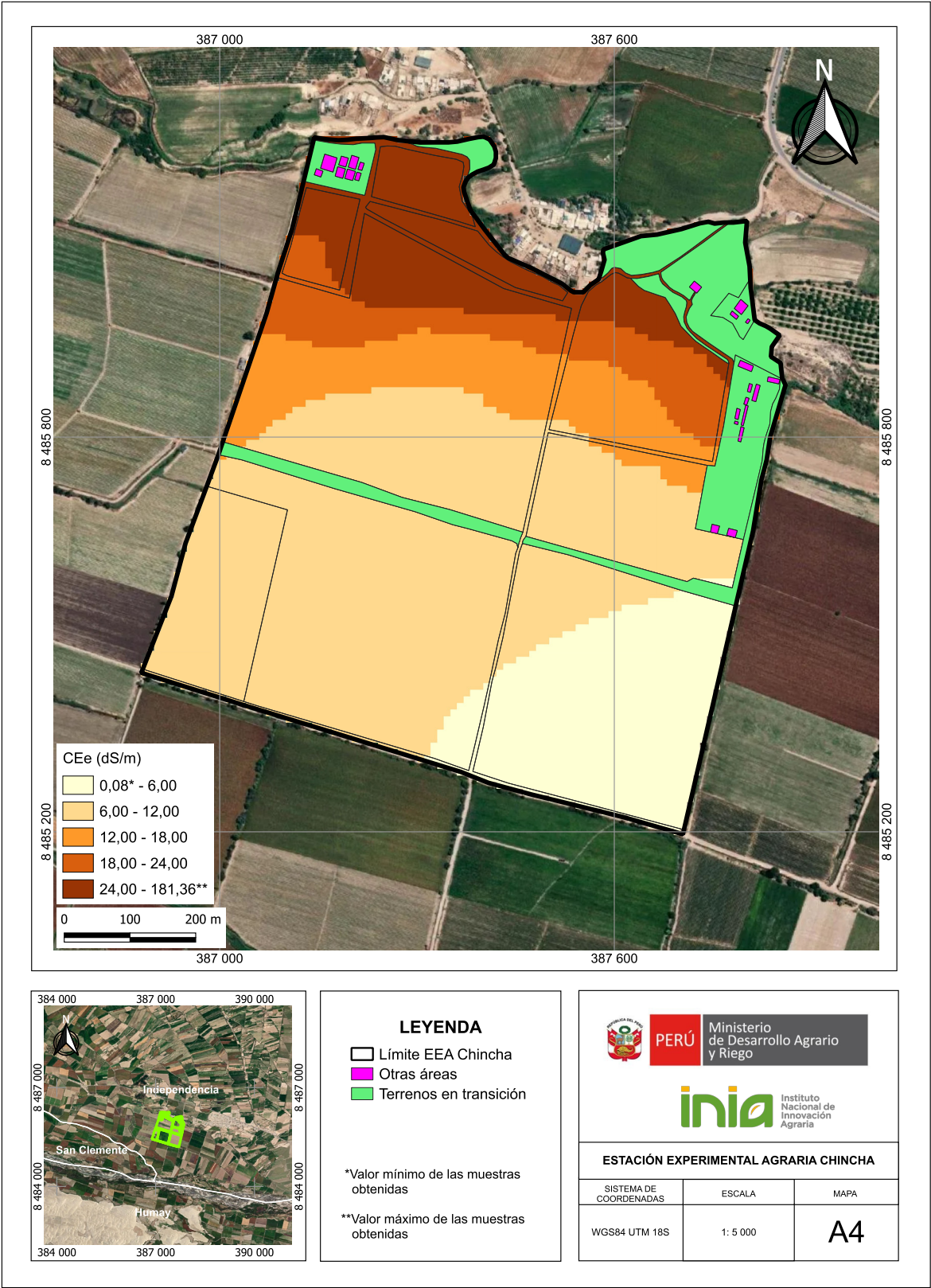


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica en extracto de saturación

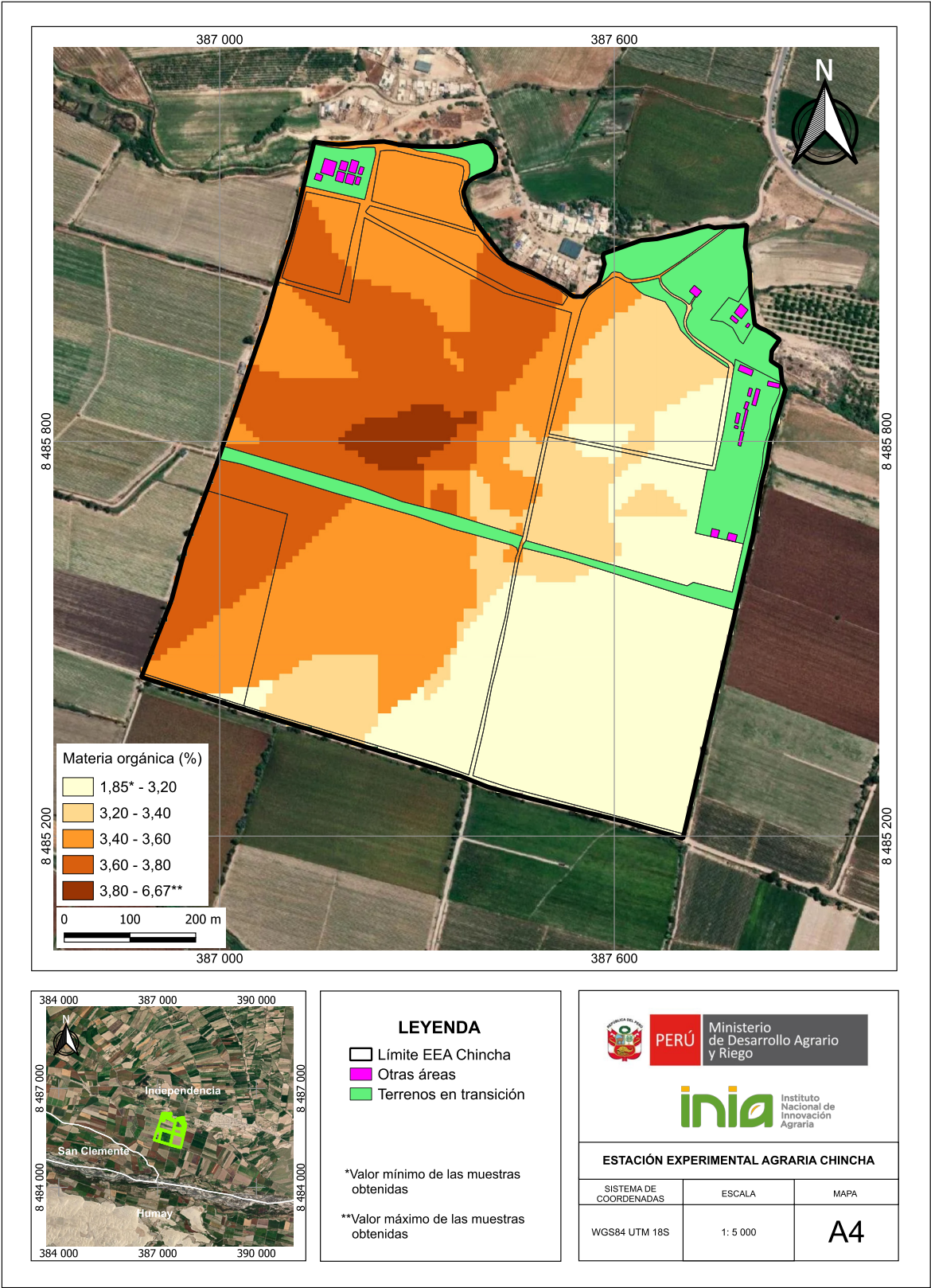


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

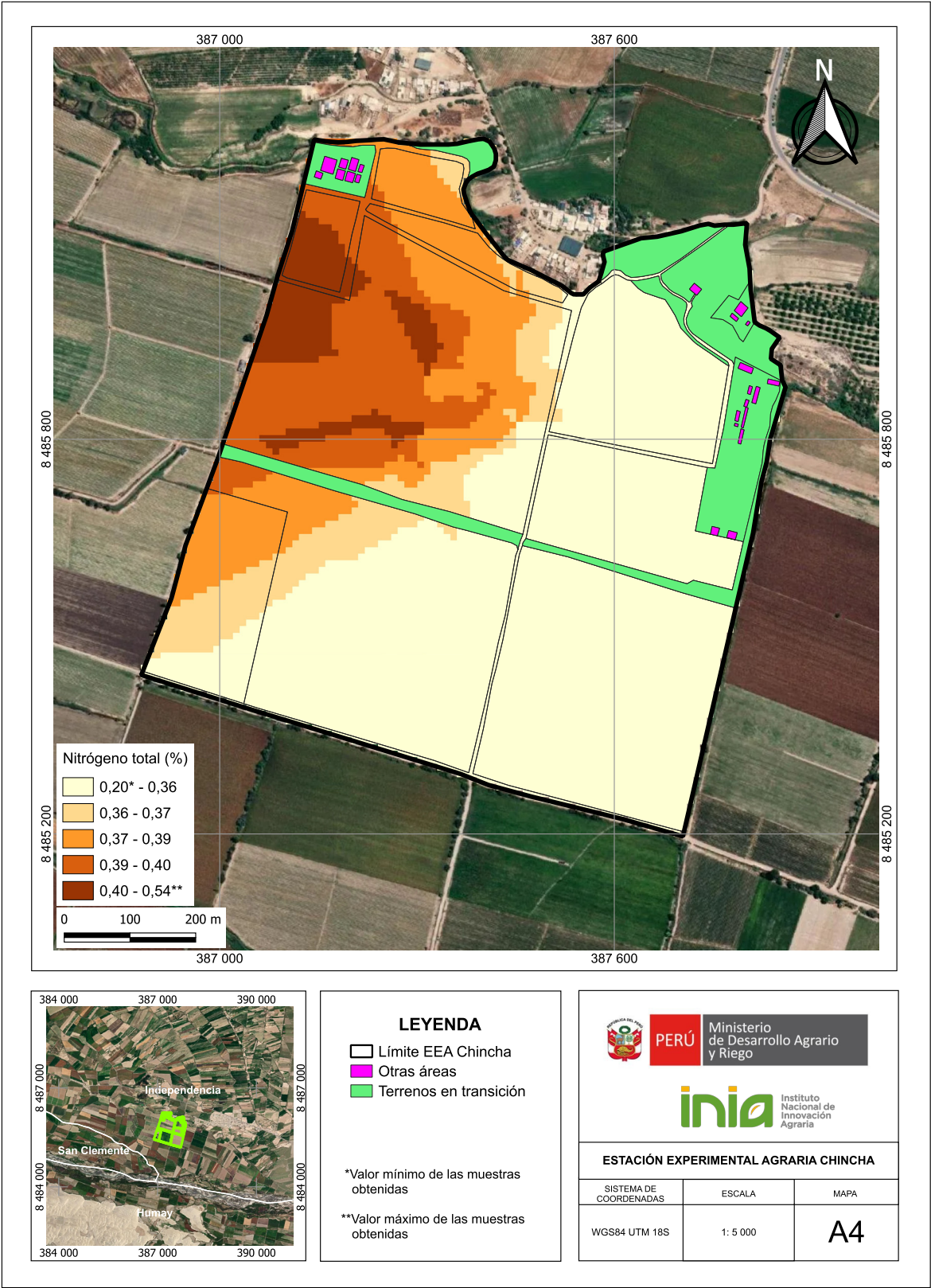


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

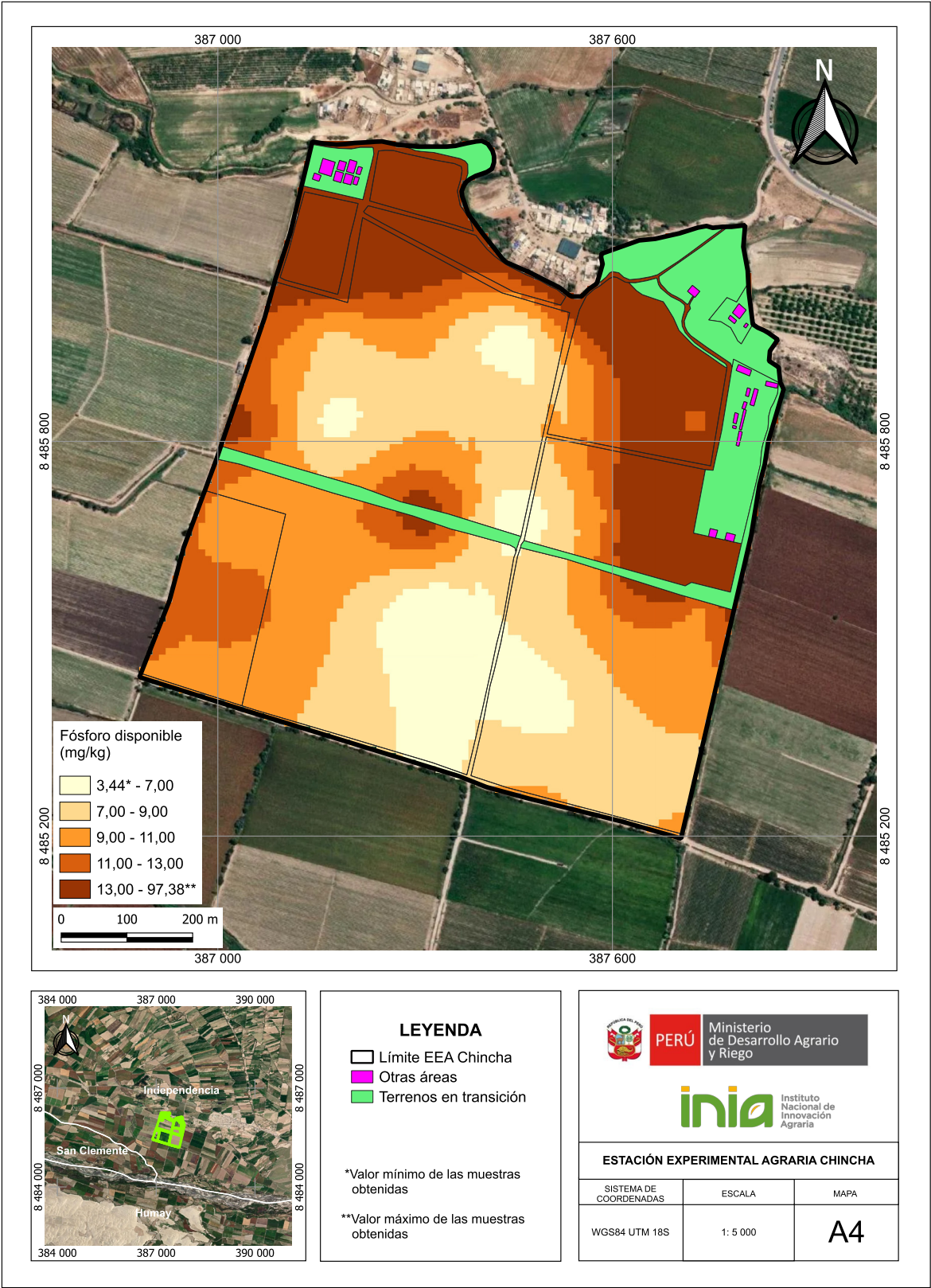


Figura 15. Mapa de variación espacial de fósforo disponible

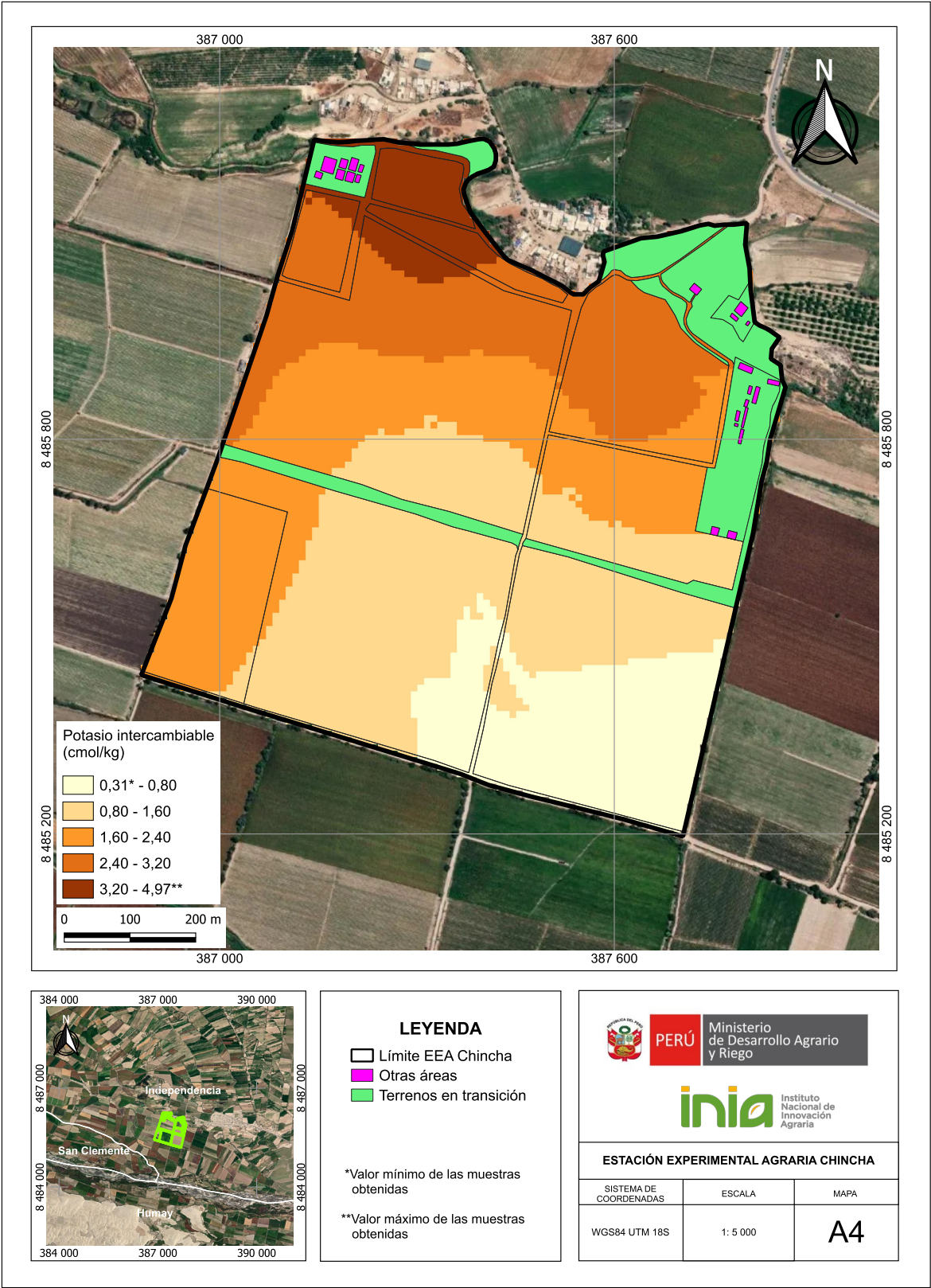


Figura 16. Mapa de variación espacial de potasio intercambiable

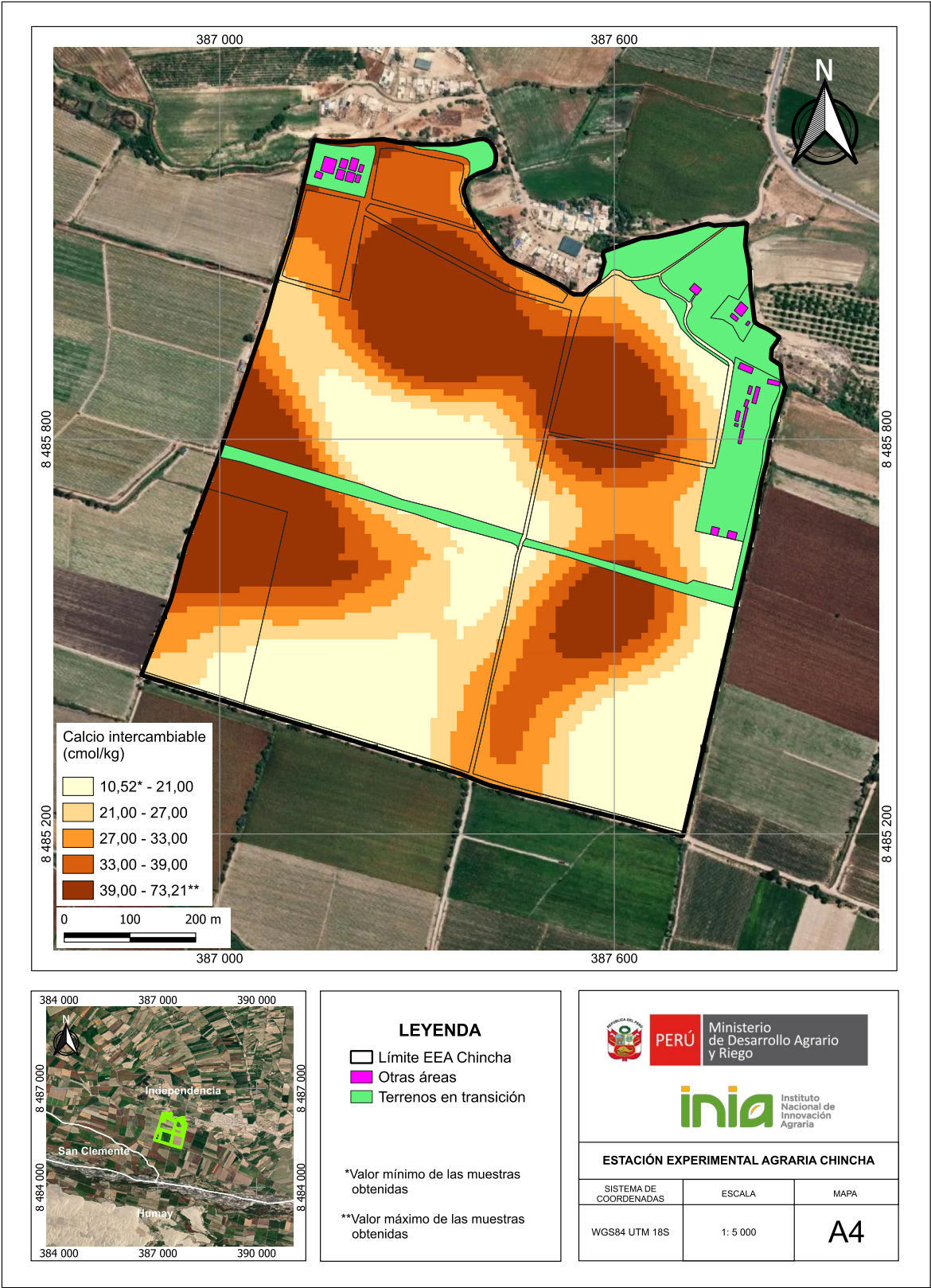


Figura 17. Mapa de variación espacial de calcio intercambiable

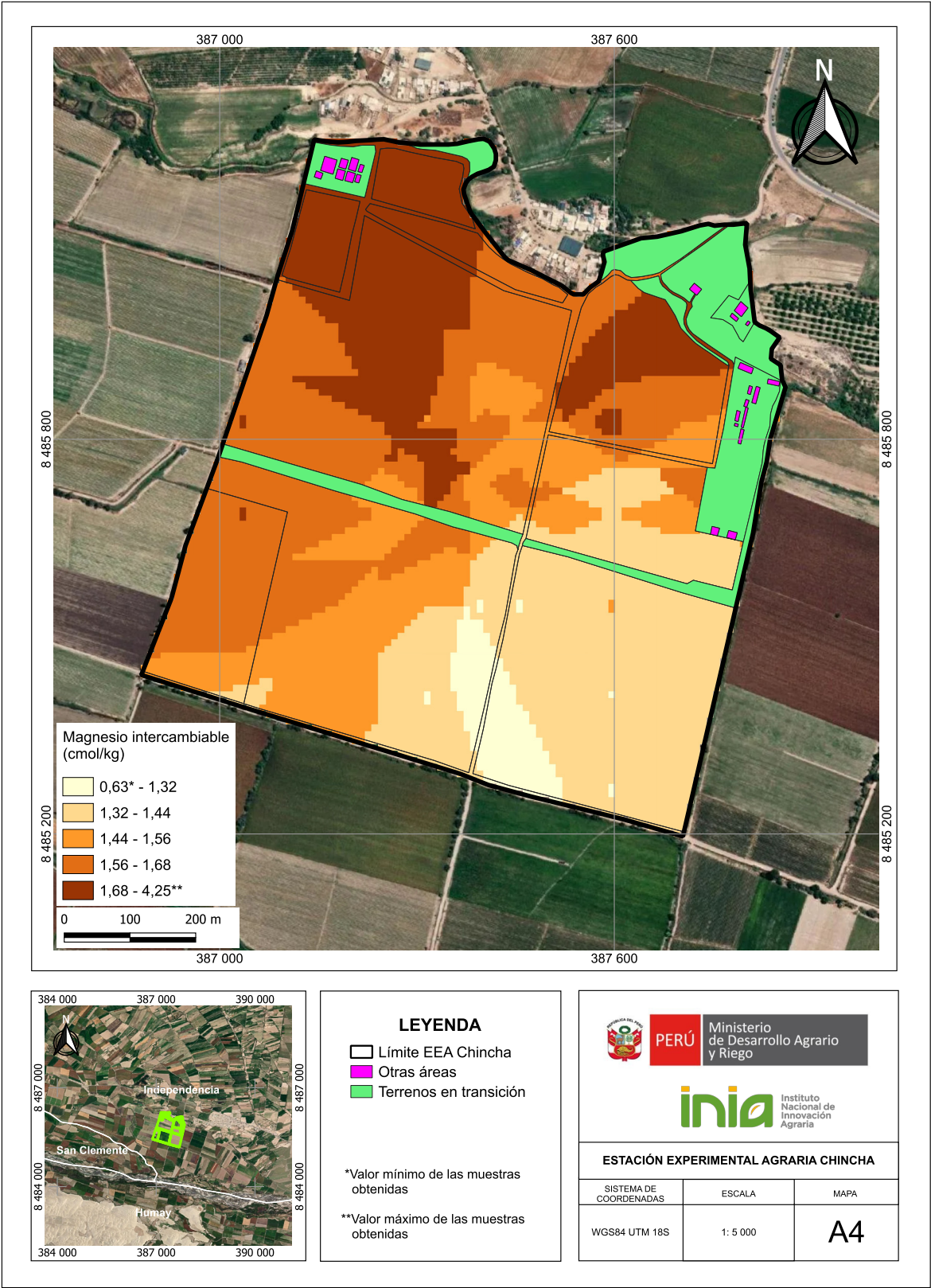


Figura 18. Mapa de variación espacial de magnesio intercambiable

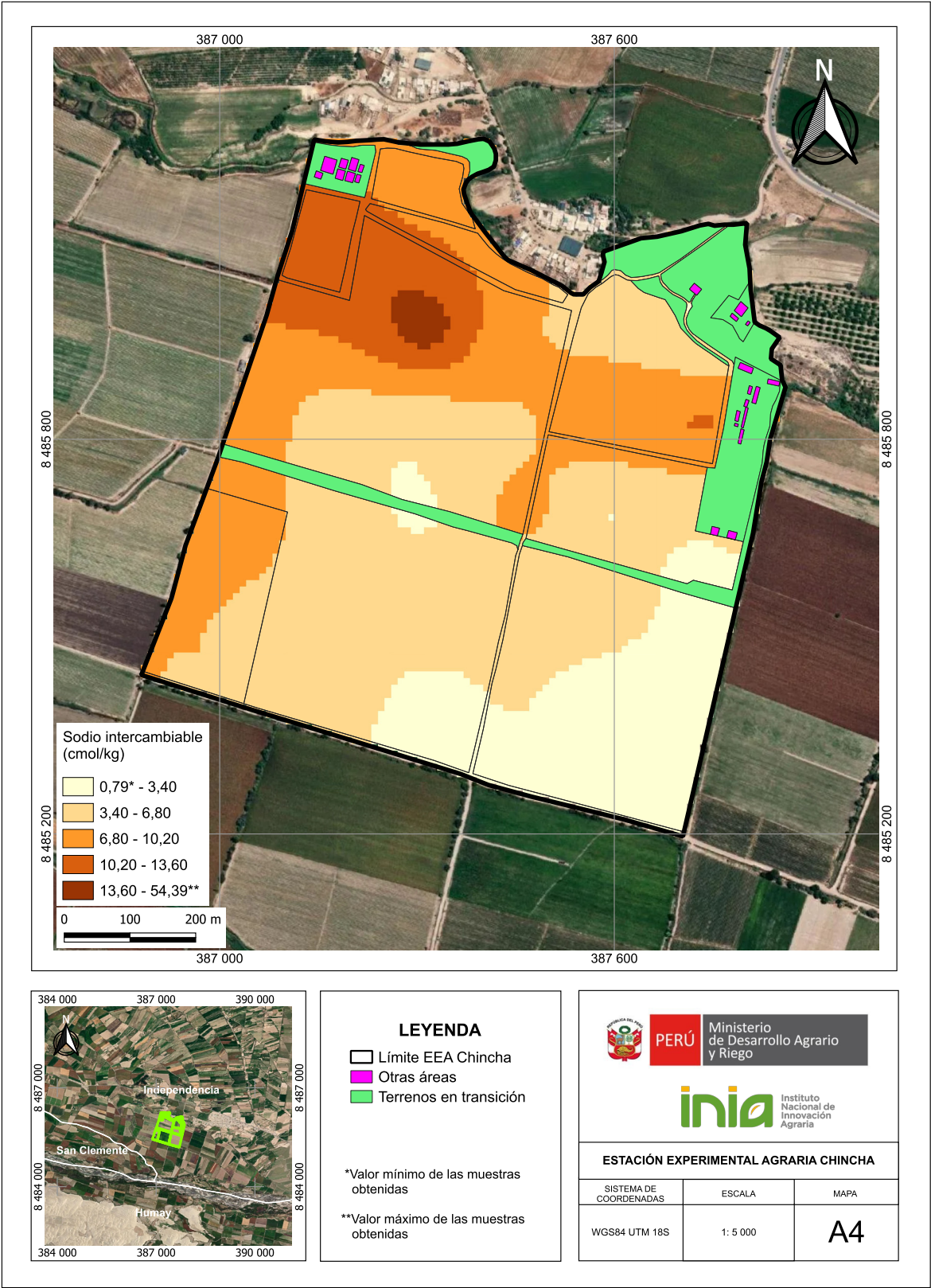


Figura 19. Mapa de variación espacial de sodio intercambiable

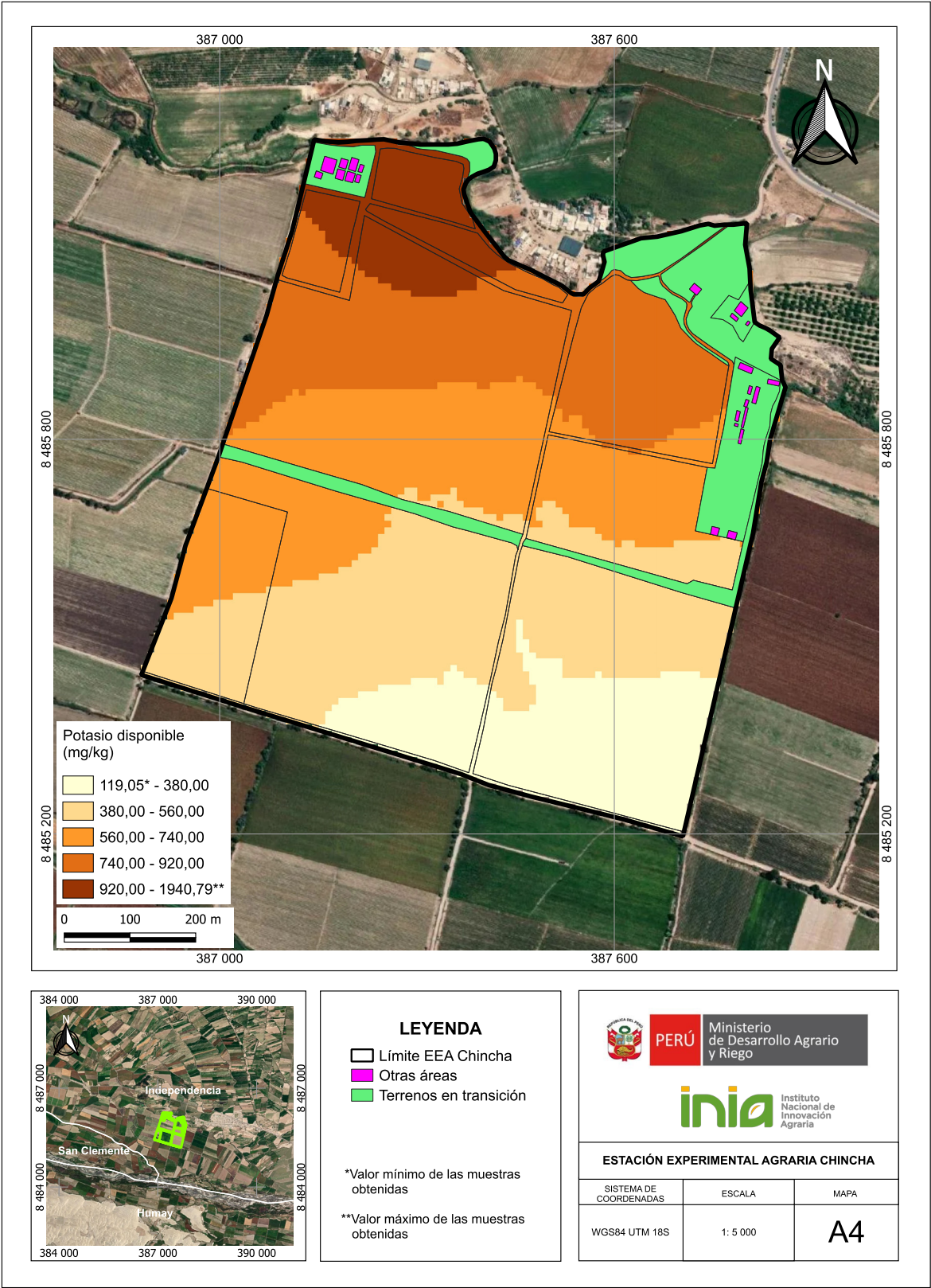


Figura 20. Mapa de variación espacial del potasio disponible

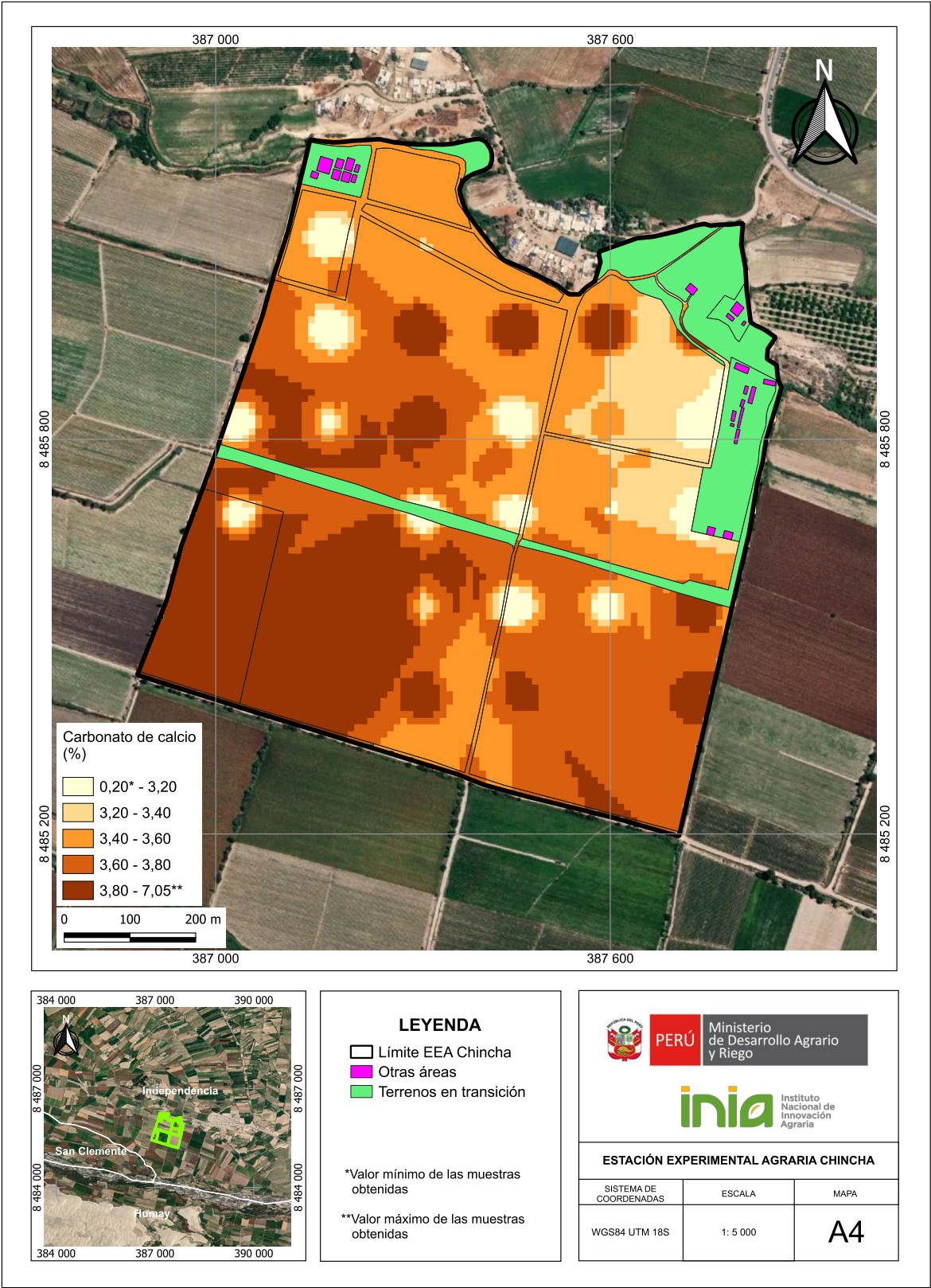


Figura 21. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

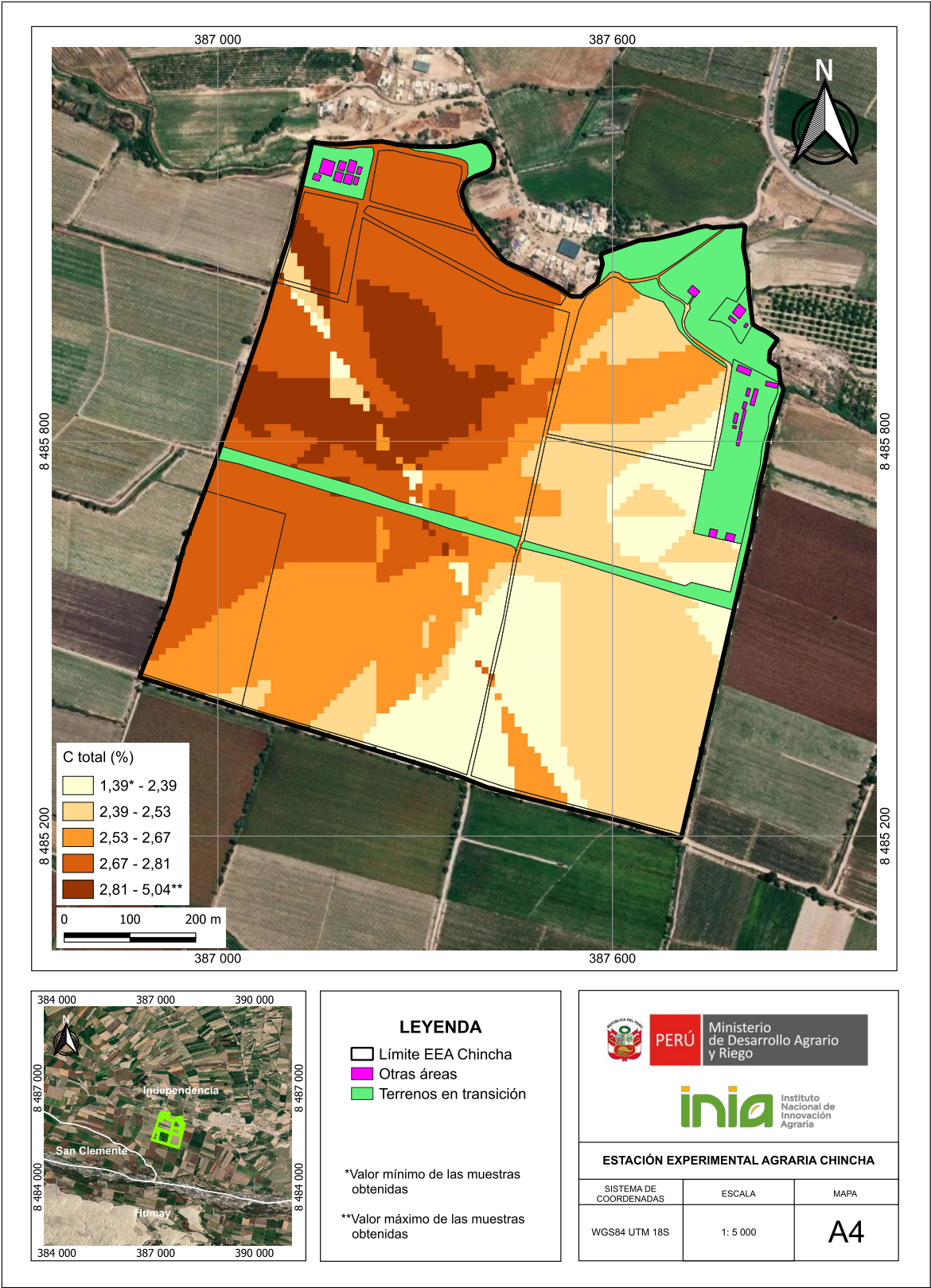


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbono total

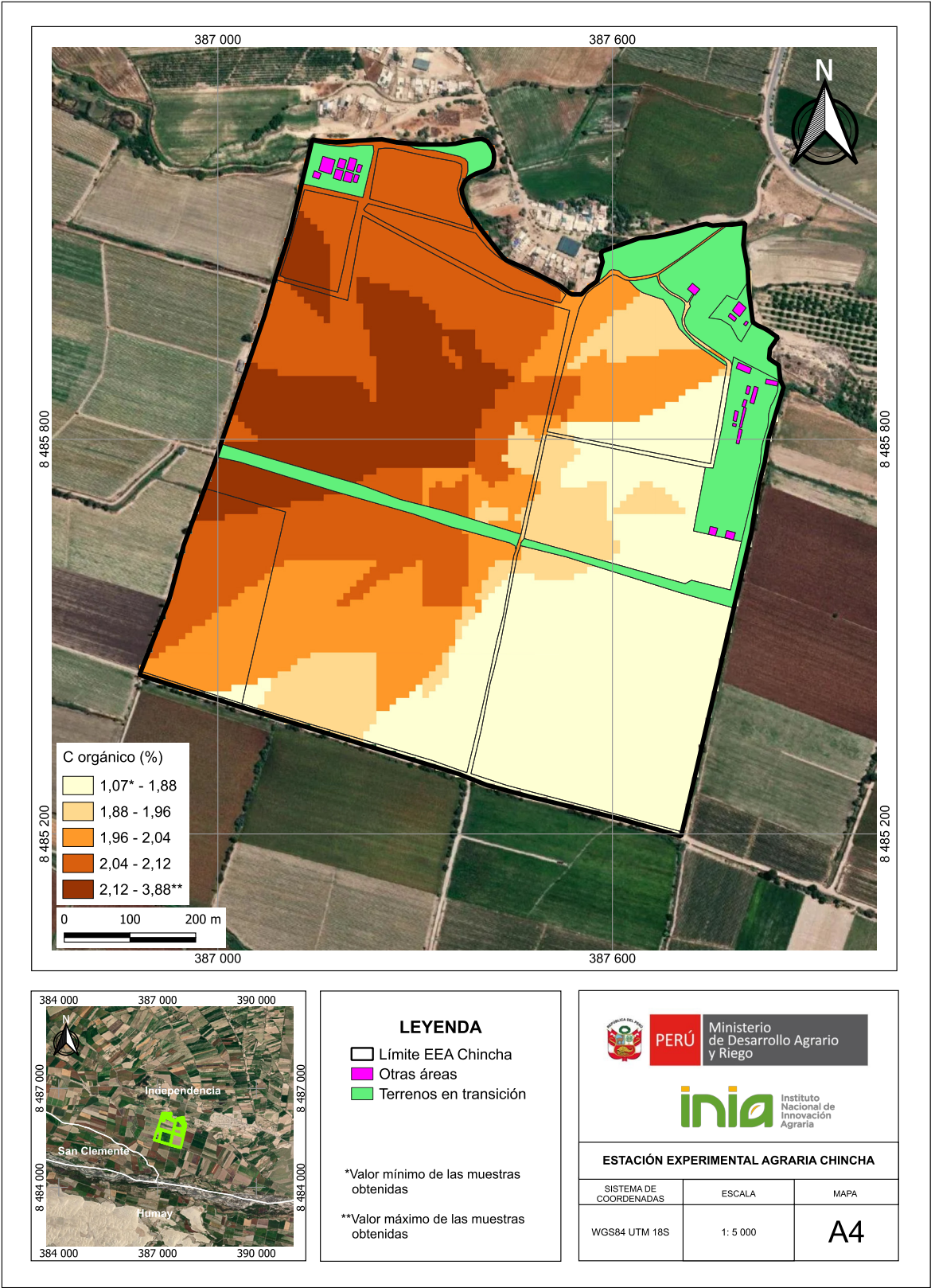


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbono orgánico

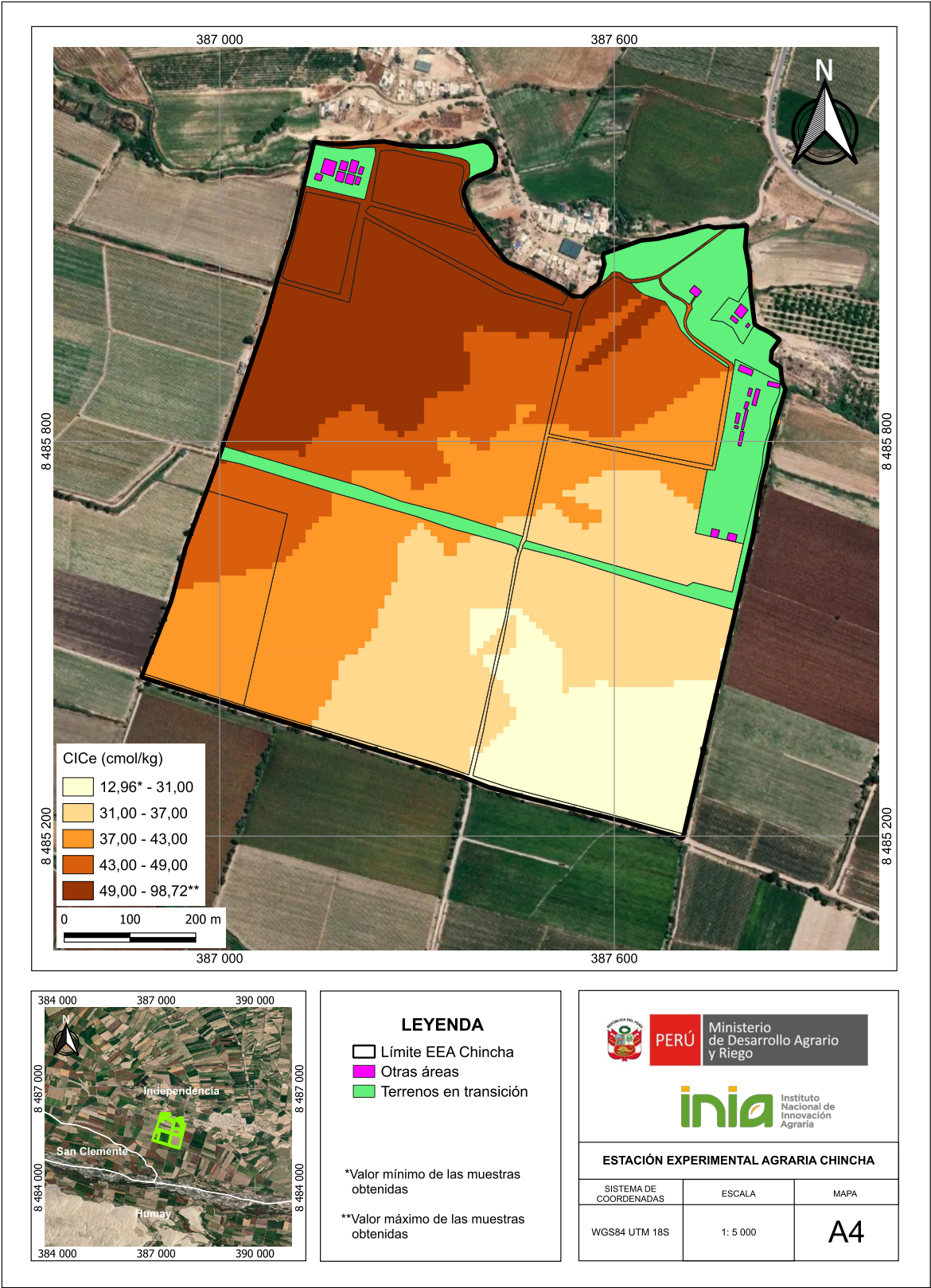


Figura 24. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva

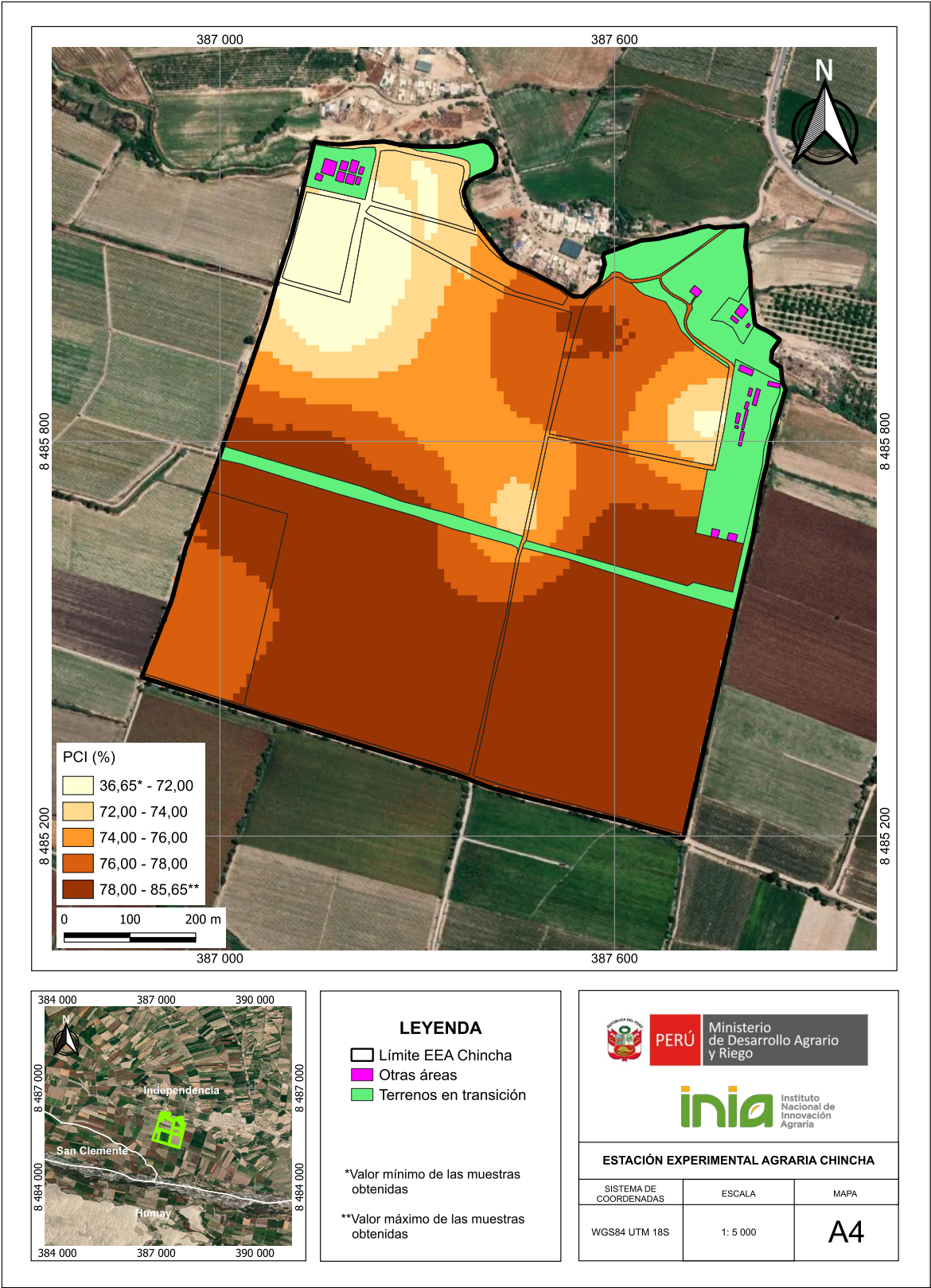


Figura 25. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

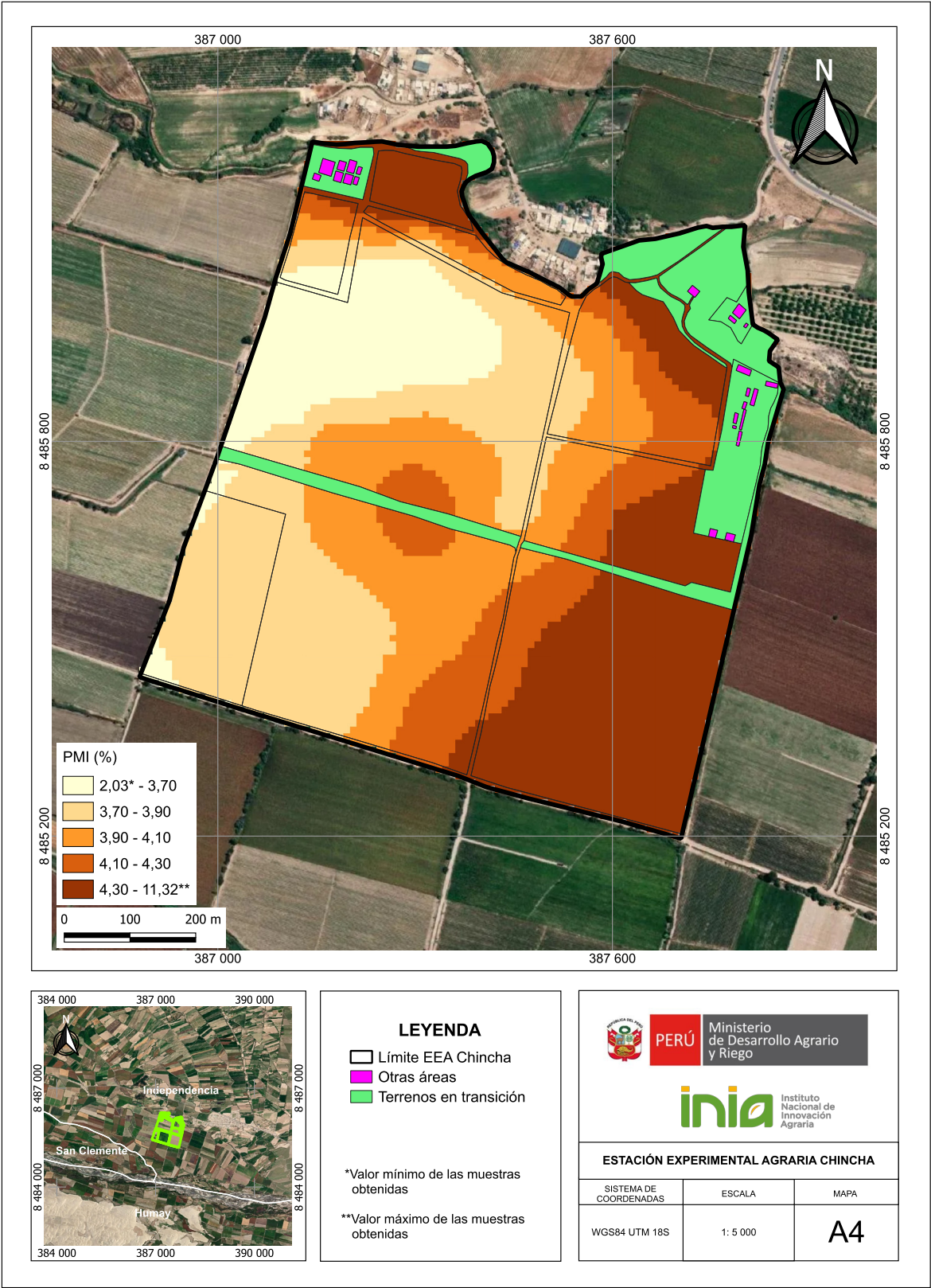


Figura 26. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

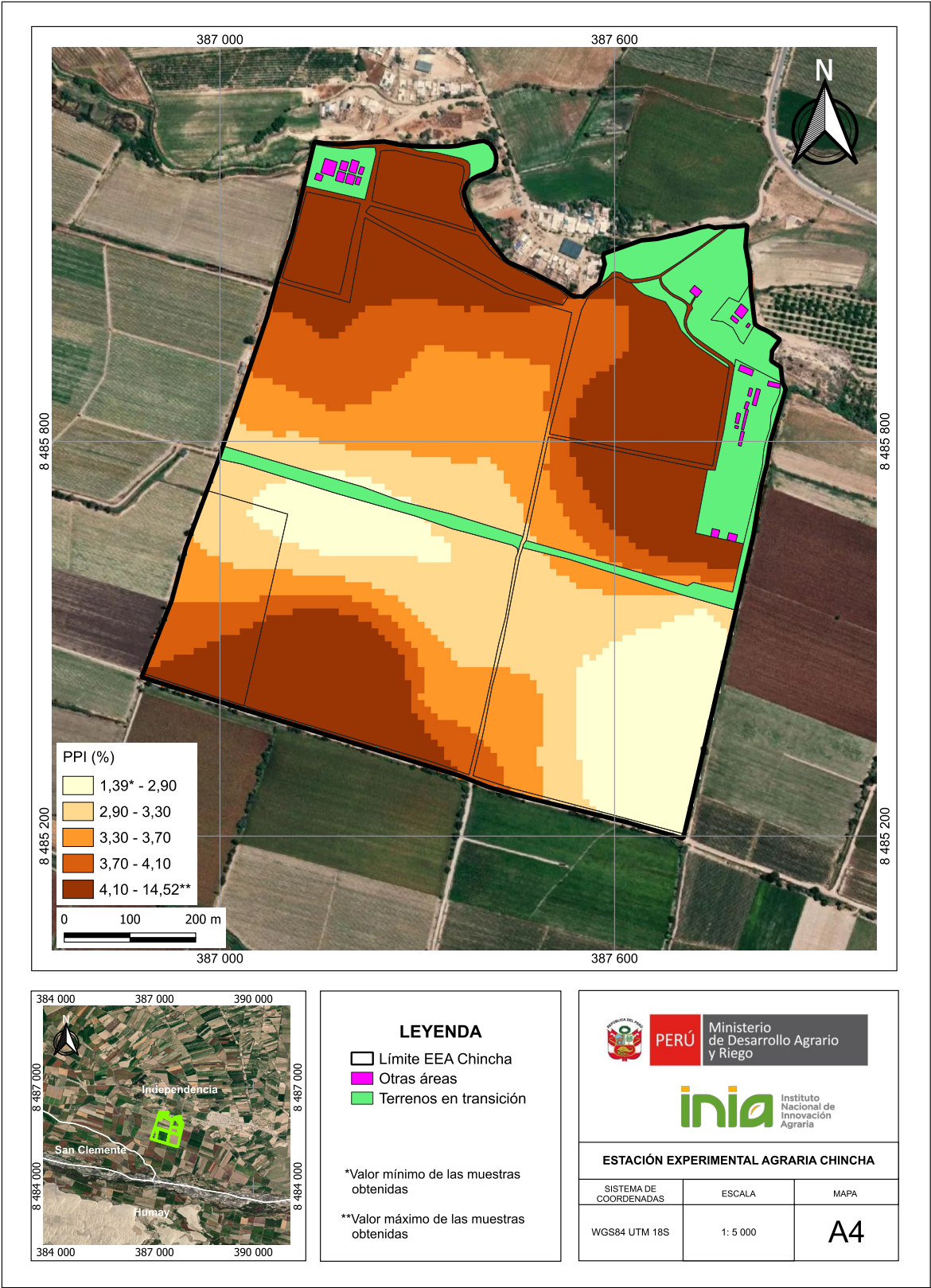


Figura 27. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

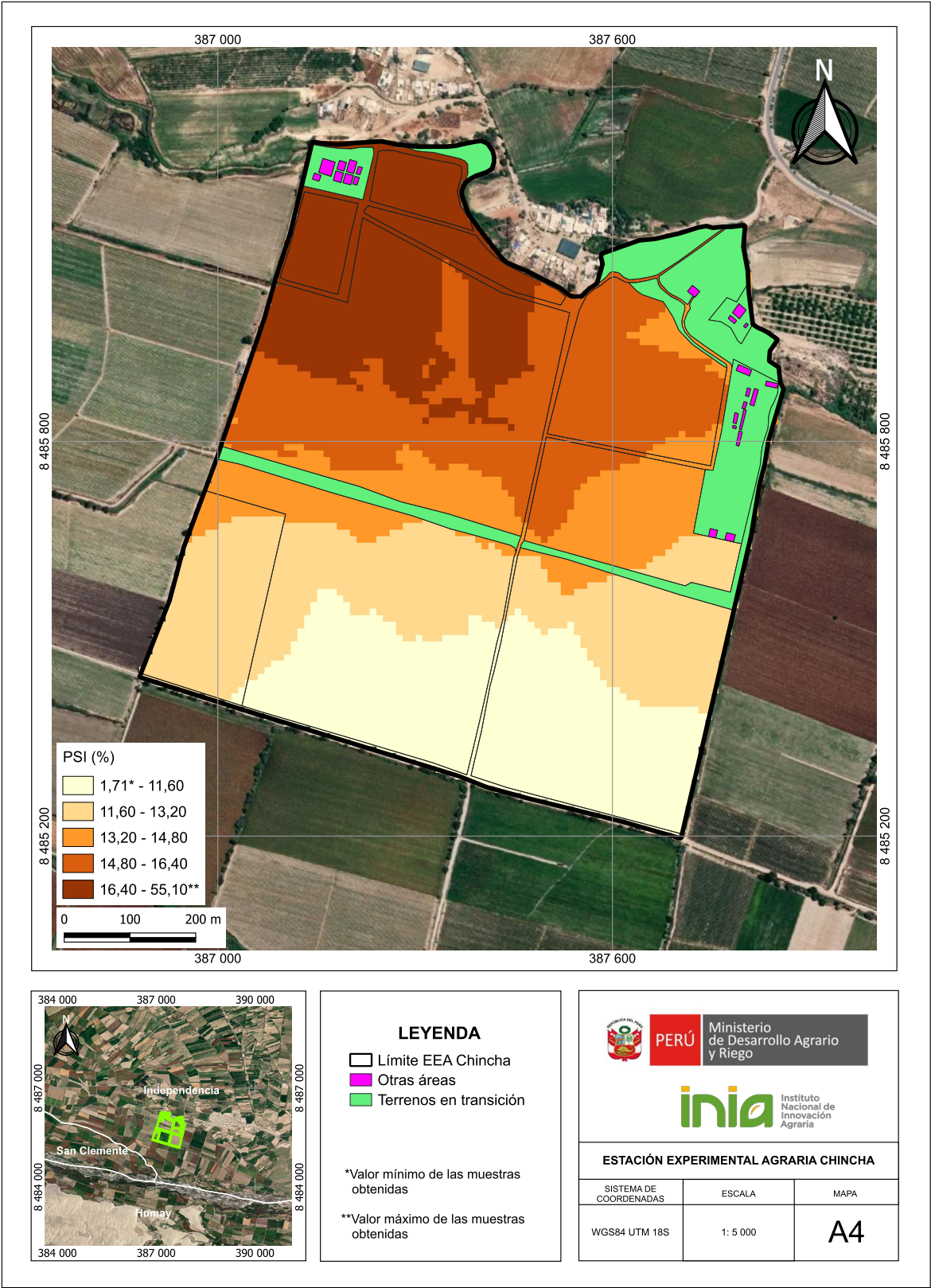


Figura 28. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable

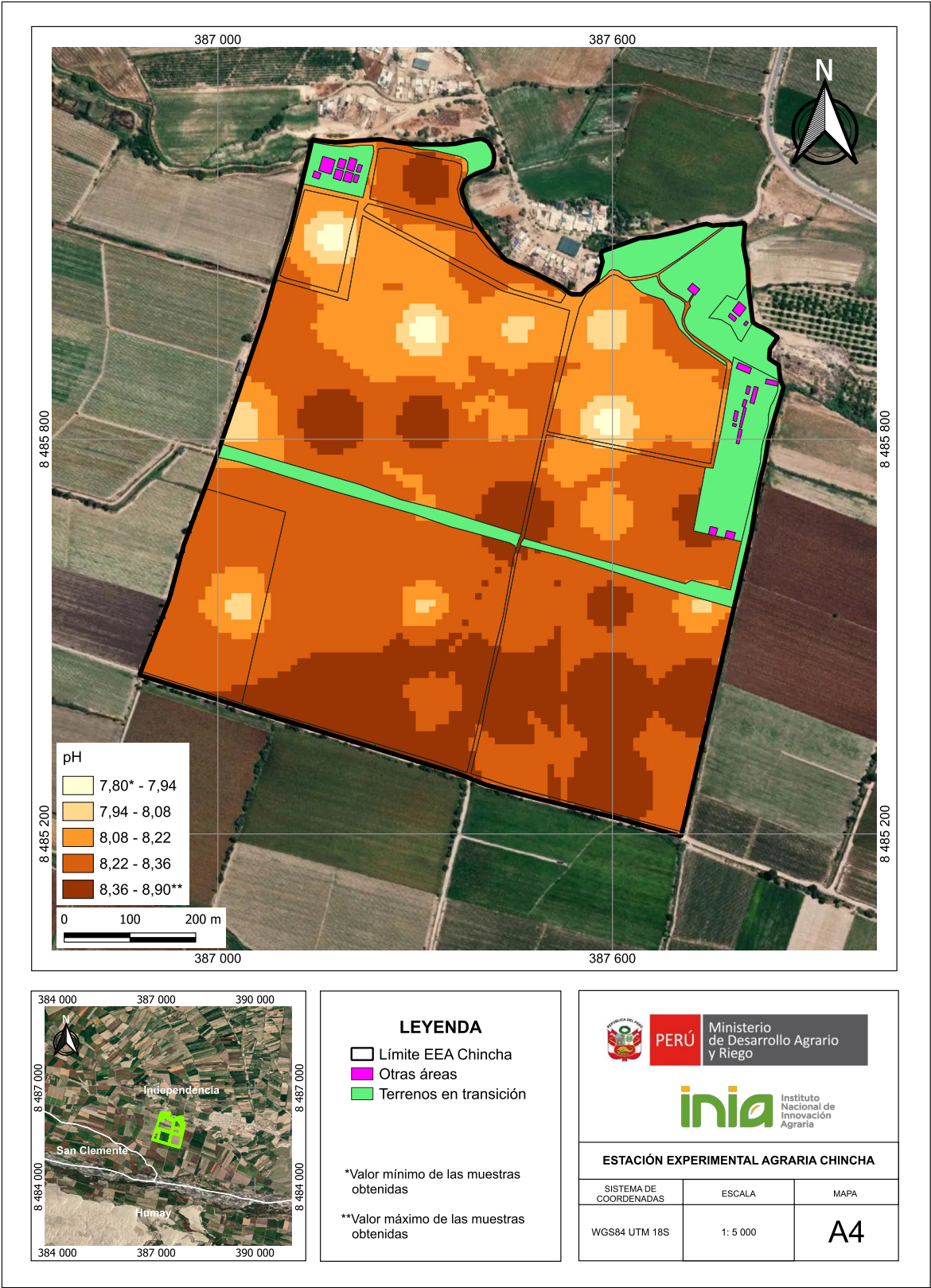


Figura 29. Mapa de variación espacial del pH



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

4.1. Variación espacial de los desbalances iónicos con niveles deficientes de Mg^{2+} y K^+

En los suelos de la EEA Chincha, los valores promedio de pH (8,26), CEE (20,2 dS m^{-1}) y contenido de $CaCO_3$ (3,58 %) mostraron evidencias no restrictivas para la interpretación de la saturación de cationes básicos. De esta manera, el diagnóstico de las relaciones catiónicas muestra que el contenido promedio de potasio (1,73 cmol kg^{-1}) y magnesio (1,7 cmol kg^{-1}) se encuentran en condiciones deficientes.

El bajo contenido de magnesio y potasio en el suelo tiene efectos negativos significativos en las plantas, dado que ambos son nutrientes esenciales para las plantas debido a su función en diversos procesos fisiológicos. El magnesio forma parte de la estructura de la clorofila al constituir el átomo central de esta molécula, por lo que resulta indispensable para la fotosíntesis. Además, interviene en la síntesis de proteínas y almidón, contribuyendo al crecimiento y desarrollo vegetal. Dado que el Mg^{2+} presenta alta movilidad dentro de la planta, las deficiencias se manifiestan primero en las hojas de mayor edad y, posteriormente, en las más jóvenes. Los síntomas característicos incluyen clorosis intervenal, evidenciada por el amarillamiento entre las nervaduras, y, cuando la deficiencia es severa, necrosis en los tejidos afectados. Por otro lado, el potasio se encuentra distribuido en la mayoría de los tejidos vegetales y desempeña un papel importante en el fortalecimiento de la resistencia de las plantas frente al ataque de enfermedades y otros factores de estrés (Mengel y Kirkby, 2000). Además, un suelo con bajo contenido de potasio afecta las relaciones catiónicas, lo que puede causar desequilibrios en la absorción de otros nutrientes, como el calcio y el magnesio.

Uno de los cultivos estratégicos en la EEA Chincha es la vid, el cual es susceptible a las deficiencias de magnesio y potasio, pudiendo afectar la formación y calidad de los racimos. Por ello, es crucial monitorear la nutrición del suelo y aplicar fertilizantes adecuados para corregir estas deficiencias, contribuyendo así a mejorar la productividad y calidad del cultivo.

4.2. Variación espacial de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del suelo constituye un parámetro fundamental para evaluar el grado de salinidad. Esta propiedad está directamente relacionada con la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo, principalmente asociadas a la presencia de iones como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), cloruros y otros elementos disueltos (Campos-Granados y Méndez, 2025).

Los suelos de la EEA Chincha presentaron una CE promedio de 20,2 dS m^{-1} y un rango que va desde 0,08 dS m^{-1} a 181,36 dS m^{-1} , lo que evidencia una elevada variabilidad espacial y presencia de zonas con niveles extremadamente altos de salinidad. En condiciones de alta salinidad, las plantas presentan dificultades para absorber agua, aun cuando esta se encuentre disponible en el suelo, debido al efecto osmótico generado por la elevada concentración de sales. Además, el exceso de sales puede provocar toxicidad iónica y alterar diversos procesos fisiológicos, lo que se traduce en una disminución del crecimiento, el desarrollo y la productividad de numerosos cultivos (Terrazas, 2019). Además, la alta concentración de sales puede desbalancear los nutrientes disponibles, interfiriendo con la absorción de elementos esenciales como potasio y calcio, lo cual afecta la salud de las plantas.

La vid es considerada un cultivo moderadamente sensible a la salinidad, dado que su rendimiento comienza a disminuir cuando la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada del suelo supera los $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Maas y Hoffman, 1977). En este contexto, los elevados niveles de salinidad presentes en gran parte de los suelos de la EEA Chíncha podrían limitar el crecimiento, desarrollo y productividad de este cultivo.

Con el fin de mitigar los efectos de la salinidad, se recomienda implementar un manejo integral que combine prácticas de riego, aplicación de enmiendas y monitoreo continuo de las condiciones del suelo. Entre las principales estrategias destaca el lavado de sales, que consiste en aplicar volúmenes adicionales de agua de buena calidad para lixiviar las sales solubles hacia horizontes más profundos del perfil. Para que esta práctica sea efectiva, es indispensable contar con un sistema de drenaje adecuado que facilite la evacuación del agua y evite problemas de encharcamiento. Asimismo, el agua de riego utilizada debe presentar una baja conductividad eléctrica, con el fin de no incrementar la acumulación de sales en el suelo. De manera complementaria, la incorporación de enmiendas orgánicas, como compost o estiércol bien descompuesto, contribuye a mejorar la estructura del suelo, incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y favorecer la retención y disponibilidad de nutrientes para las plantas. Además, el uso de cultivos tolerantes a la sal puede ser una estrategia útil si los niveles de salinidad son muy altos, aunque es importante monitorear constantemente el pH y la salinidad del suelo.

En las zonas con alta concentración de sodio intercambiable, condición que se presenta en gran parte de los suelos de la EEA Chíncha, la aplicación de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) constituye una práctica recomendable. El calcio aportado por esta enmienda desplaza al sodio de los sitios de intercambio del suelo, favoreciendo su lixiviación, mejorando la estructura del suelo y reduciendo los efectos asociados a la sodicidad.

Asimismo, la fertilización debe planificarse de manera equilibrada, evitando el uso excesivo de fertilizantes con elevado contenido de sales solubles que puedan agravar los problemas de salinidad. De igual manera, es fundamental realizar un monitoreo periódico de la conductividad eléctrica, el sodio intercambiable y otros indicadores de fertilidad del suelo, con el fin de ajustar las prácticas de manejo de acuerdo con las condiciones del terreno y mantener un ambiente favorable para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos.

4.3. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.3.1. Cálculos del requerimiento de fertilización fosforada según los criterios de mantenimiento y construcción para la vid

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo esférico, donde el *nugget* (C_0) fue de 6,86 y el *sill* ($C_0 + C$) de 91,65. Esto sugiere que el fósforo disponible varía a pequeña escala, posiblemente por una distribución irregular de fertilizantes o diferencias en capacidad de adsorción del suelo.

El rango de autocorrelación espacial es de 421,20 m, y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,07$) y un RMSE de 9,97 mg kg⁻¹. Esta 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 estimar los requerimientos de fertilización fosforada en el cultivo de vid, se considerará un nivel crítico de fósforo disponible de 20 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 31 t ha⁻¹ bajo un sistema de producción convencional con alta tecnología. Dado que el menor contenido de fósforo disponible registrado en los suelos evaluados fue de 3,44 mg kg⁻¹, es previsible una respuesta favorable a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Con fines ilustrativos, los cálculos se realizarán utilizando este valor como caso de referencia y se formulará con base en los criterios de mantenimiento y construcción de la fertilidad del suelo, buscando tanto reponer el fósforo extraído por la cosecha como incrementar las reservas del nutriente para garantizar su disponibilidad en campañas futuras. El procedimiento de cálculo seguirá la metodología propuesta por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 3,44 mg de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 20 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 31 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 6,2 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 6,2 \text{ t ha}^{-1} = 2,17 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 6,2 \text{ t ha}^{-1} + 2,17 \text{ t ha}^{-1} = 8,37 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0,6 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0,6 \text{ kg de P t}^{-1} \times 8,37 \text{ t ha}^{-1} = 5,02 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{5,02 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 25,1 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 9 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.

$$\text{RC} = 1,5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{9 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 25,1 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 38,6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 192,16 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 vid.

4.3.2. Cálculos del requerimiento de fertilización potásica según el criterio de suficiencia para la vid

Los indicadores geoestadísticos del K disponible del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 453,400 mg kg⁻¹ y R² = 0,07). La media fue de 674,86 mg kg⁻¹, lo que indica un nivel alto para la mayoría de los cultivos, con un rango que va de 119,05 a 1940,79 mg kg⁻¹. La disponibilidad de potasio es variable y 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 (119,05 mg kg⁻¹) para hacer el cálculo de requerimiento de fertilización con el fin de reponer lo extraído por el cultivo, haciendo uso del criterio de suficiencia.

Para la vid, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 150 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 31 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 119,05 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %. El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al., (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento con 119,05 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 31 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 24,8 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 24,8 \text{ t ha}^{-1} = 8,68 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 24,8 \text{ t ha}^{-1} + 8,68 \text{ t ha}^{-1} = 33,48 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 33,48 \text{ t ha}^{-1} = 669,6 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 1344 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. Con esta dosis de fertilización se repone lo extraído por el cultivo de vid.



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://www.redalyc.org/journal/911/91168742009/html/>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Banco Central de Reserva del Perú. (2022). Caracterización del departamento de Ica. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Huancayo/ica-caracterizacion.pdf>
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Campos-Granados, M. F., y Mendez, J. C. (2025). Relación entre metodologías de determinación de conductividad eléctrica y concentración de cationes solubles en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/vf5xpa16>
- 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., Springer, 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>
- 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/>
- Hag Husein, H., Lucke, B., Bäuml, R., & Sahwan, W. (2021). A contribution to soil fertility assessment for arid and semi-arid lands. *Soil Systems*, 5(3), 42. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030042>
- 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>
- 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.
- 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>
- Maas, E. V., y Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance: Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103, 115–134.
- 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. 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>
- Mengel, K., y Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). International Potash Institute.
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C., y Bolan, N. S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>
- 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. <https://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 Canadá*. 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.
- Sakadevan, K., y Nguyen, M. L. (2010). Extent, impact, and response to soil and water salinity in arid and semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 109, 55–74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385040-9.00002-5>

- 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).
- Terrazas, J. M. R. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5(1), 1539-1563. <http://apthapi.agro.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/28>
- 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. <http://hdl.handle.net/10125/56495>

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 Chinchá - Ica









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

ISBN: 978-9972-44-278-0



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



@INIAPeru