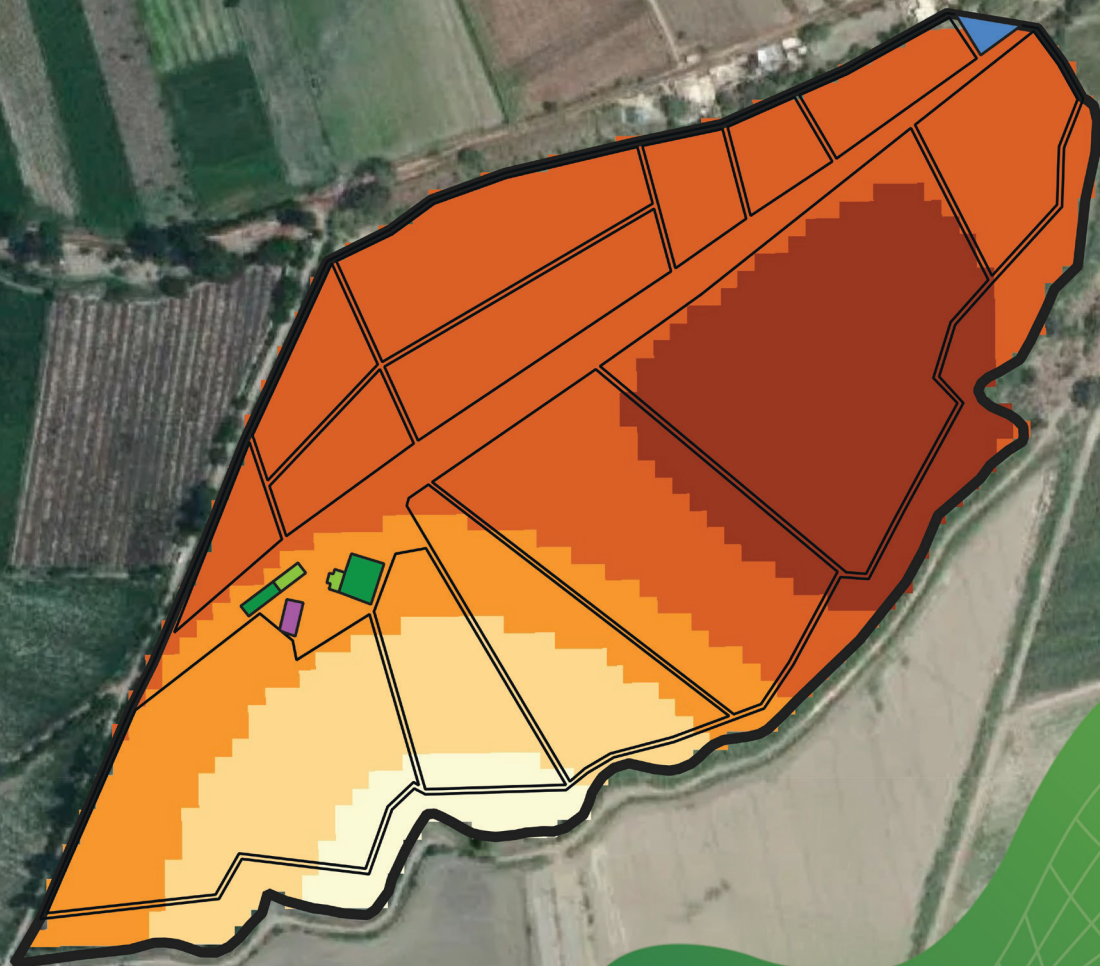


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Virú



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria



The background image shows a lush green rice field in the foreground, with a line of palm trees and a fence in the middle ground. The sky is a clear, light blue. The overall scene is bright and sunny.

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 Virú



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA VIRÚ

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Felipe César Meza Millán

Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Jorge Luis Sáenz Rabanal

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Julio, 2026

Publicado:

Julio, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-273-5

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° 2026-08764

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruth L. Mercado-Chinchay, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Remon, 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 Virú	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	31
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	32
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	32
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	32
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	32
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Resultados del análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	34
3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo	36
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Virú	47
4.1. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	47
4.1.1. Fertilización de construcción para incrementar el P disponible	47
4.1.2. Fertilización de mantenimiento y construcción para incrementar el K disponible	48
4.2. pH del suelo	50
5. Referencias bibliográficas	53



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), cuyas competencias comprenden la 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 es importante porque influye directamente en el crecimiento de los cultivos, el rendimiento de la cosecha y el buen aprovechamiento de los fertilizantes. Por ello, conocer cómo varían las propiedades del suelo dentro de un terreno permite tomar mejores decisiones para el manejo agrícola. En este sentido, el uso de herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG) y el análisis geoespacial ayuda a identificar las zonas con diferentes niveles de fertilidad, facilitando la aplicación más eficiente de fertilizantes y otras prácticas de manejo agronómico. Bajo este enfoque, la Estación Experimental Agraria Virú (EEA Virú), ubicada en la región La Libertad, constituye un espacio donde se pueden realizar estudios de fertilidad y mapeo de suelos, generando información útil para una gestión y producción agrícola más eficiente y sostenible.

El documento “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Virú” presenta los resultados del muestreo y evaluación de los suelos agrícolas, permitiendo conocer cómo varían sus características en diferentes zonas del terreno. Además, describe de manera clara el proceso de análisis geoespacial utilizado, el cual puede aplicarse en otros campos y sistemas de producción agrícola. La información generada permite identificar las condiciones reales del suelo y brinda una base técnica para facilitar la toma de mejores decisiones sobre fertilización, manejo del cultivo y aprovechamiento del terreno. De esta manera, se busca contribuir a una agricultura más productiva, rentable y sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La región de La Libertad, ubicada en la costa norte del Perú, se ha consolidado como una de las principales zonas agroindustriales del país, destacando por la producción intensiva de cultivos de alto valor comercial, como arándano, palta y espárrago (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, 2025). Asimismo, la franja costera de la región comprende aproximadamente la cuarta parte de su territorio y se caracteriza por presentar un relieve ligeramente ondulado, extensos valles, un clima semicálido y suelos predominantemente arenosos (Ministerio del Ambiente, 2009).

En los ecosistemas áridos, la degradación edáfica suele originarse por procesos de salinización natural (Sakadevan y Nguyen, 2010), condición que frecuentemente se exacerba debido a una gestión ineficiente del recurso hídrico y al uso intensivo de fertilizantes sintéticos (Mukhopadhyay et al., 2021). Estos suelos se caracterizan por su limitado contenido de materia orgánica, baja fertilidad natural y valores de pH elevados (Hag Husein et al., 2021). Ante este escenario, resulta imperativo implementar prácticas de agricultura de precisión que permitan mitigar estas limitantes y optimizar la productividad sin comprometer la sostenibilidad a largo plazo ni acelerar los procesos de salinización secundaria.

En ese contexto, el monitoreo sistemático de la fertilidad edáfica se establece como un pilar fundamental para la gestión sostenible de la producción agrícola, especialmente en agrosistemas áridos donde los recursos hídricos y edáficos son críticos. La integración de enfoques de agricultura de precisión en los programas de fertilización, mediante el uso de herramientas geoestadísticas, análisis de suelos y Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite modelar con precisión la variabilidad espacial de los nutrientes a través de métodos como la interpolación *kriging*, el índice de Moran y el análisis de semivariogramas. Los resultados derivados de estas técnicas son determinantes para el diseño de estrategias de fertilización diferenciadas por zonas de manejo, optimizando la eficiencia en el uso de insumos y garantizando la preservación de la salud del suelo a largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

El presente documento tiene como objetivo proporcionar una guía metodológica para la caracterización de la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en la Estación Experimental Agraria Virú, mediante la integración de herramientas de agricultura de precisión y análisis geoestadístico. A través de la aplicación de modelos de interpolación y la evaluación de la autocorrelación espacial, se busca delimitar zonas de manejo diferenciadas que sirvan de base para la prescripción de una fertilización eficiente, contribuyendo así a la mitigación de los procesos de degradación y al fortalecimiento de la sostenibilidad productiva en la EEA.



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).

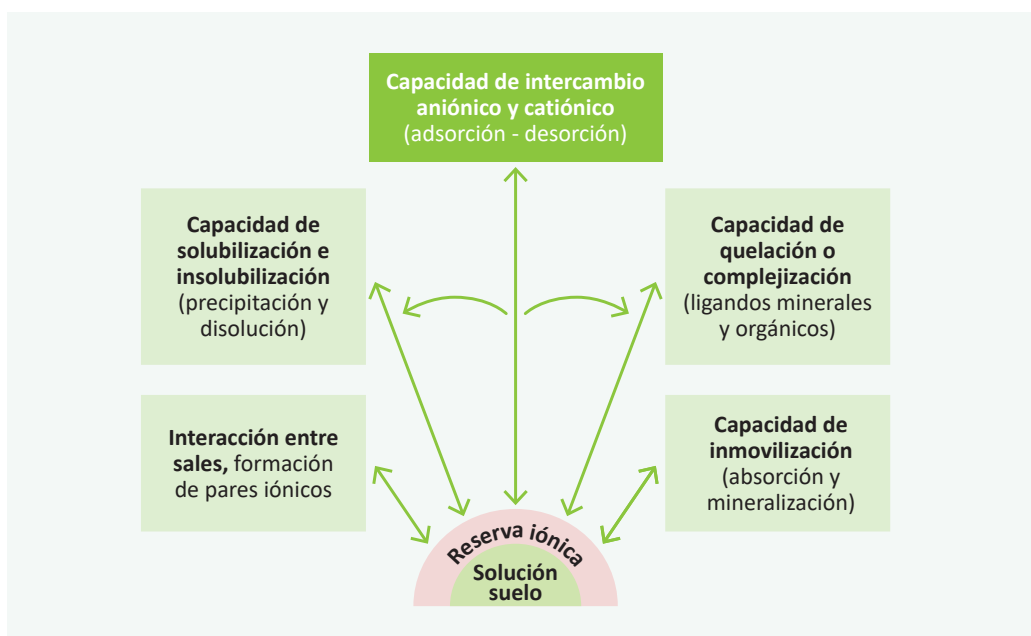


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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, ya 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+} . 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) (Espinoza y Molina, 1999).

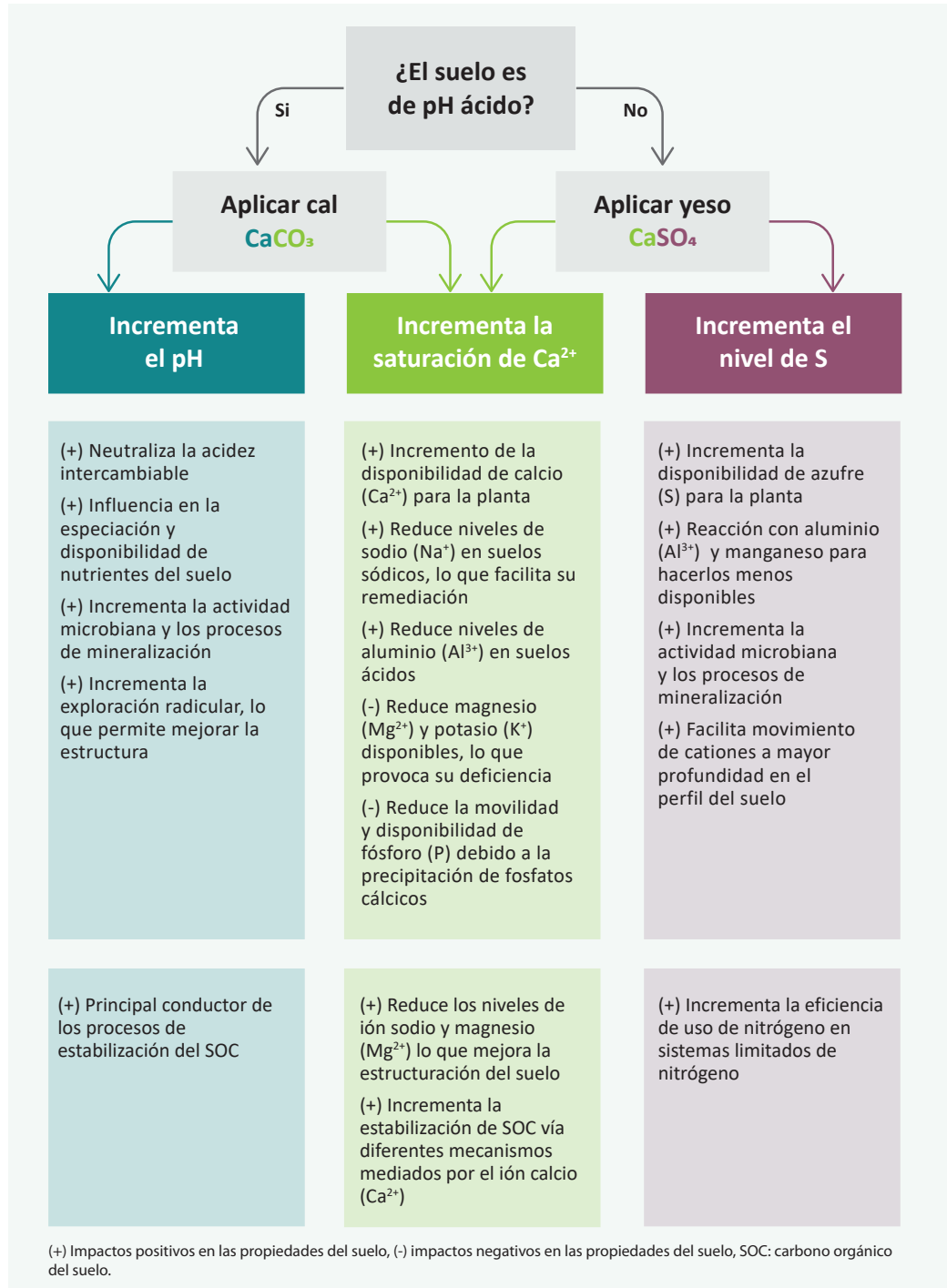


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (BCSR) (adaptado de Culman et al., 2021)

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.

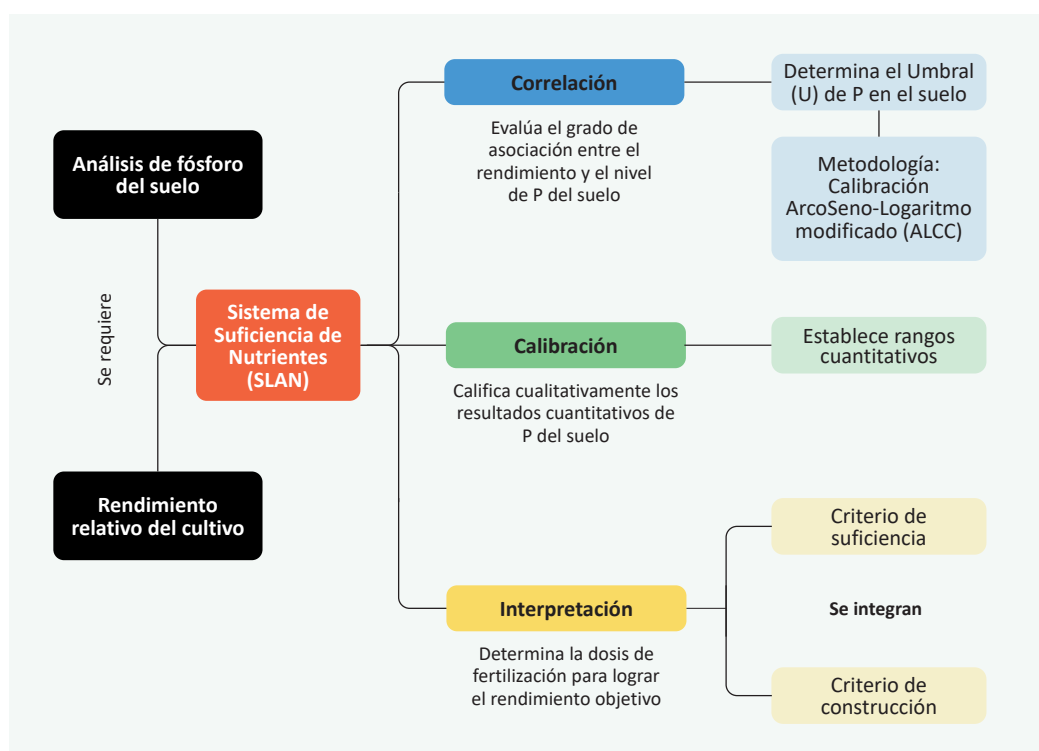


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, 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 30 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 70 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{70 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 21 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 70 % del potencial, 21 t ha⁻¹ en lugar de 30 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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 21 \text{ t ha}^{-1} = 7,35 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 21 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 7,35 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 7,35 \text{ t ha}^{-1} + 21 \text{ t ha}^{-1} = 28,35 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,03 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1,03 \text{ kg de P t}^{-1} \times 28,35 \text{ t ha}^{-1} = 29,2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 29,2 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 28,35 t ha⁻¹, el cual está conformado por 7,35 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 21 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 a los criterios de mantenimiento y construcción, estos se aplican cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutrientes estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos en el cultivo de palto para la aplicación del criterio de mantenimiento, y 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 palto, y se obtuvo 10 mg de P 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 30 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 40 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 30}{100} = 12 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 12 \text{ t ha}^{-1} = 4,2 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4,2 \text{ t ha}^{-1} + 12 \text{ t ha}^{-1} = 16,2 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,03 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,03 \text{ kg de P t}^{-1} \times 16,2 \text{ t ha}^{-1} = 16,69 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

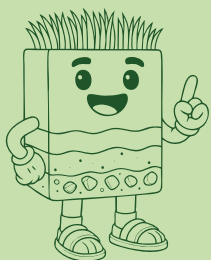
$$\text{RM de P} = \frac{16,69 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,3} = 55,63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de palto es 55,63 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

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

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 30 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 20 %.



Nota:

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{20 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 6 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

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

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

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

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1,03 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1,03 \text{ kg de P t}^{-1} \times 8,1 \text{ t ha}^{-1} = 8,34 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8,34 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,2} = 41,7 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

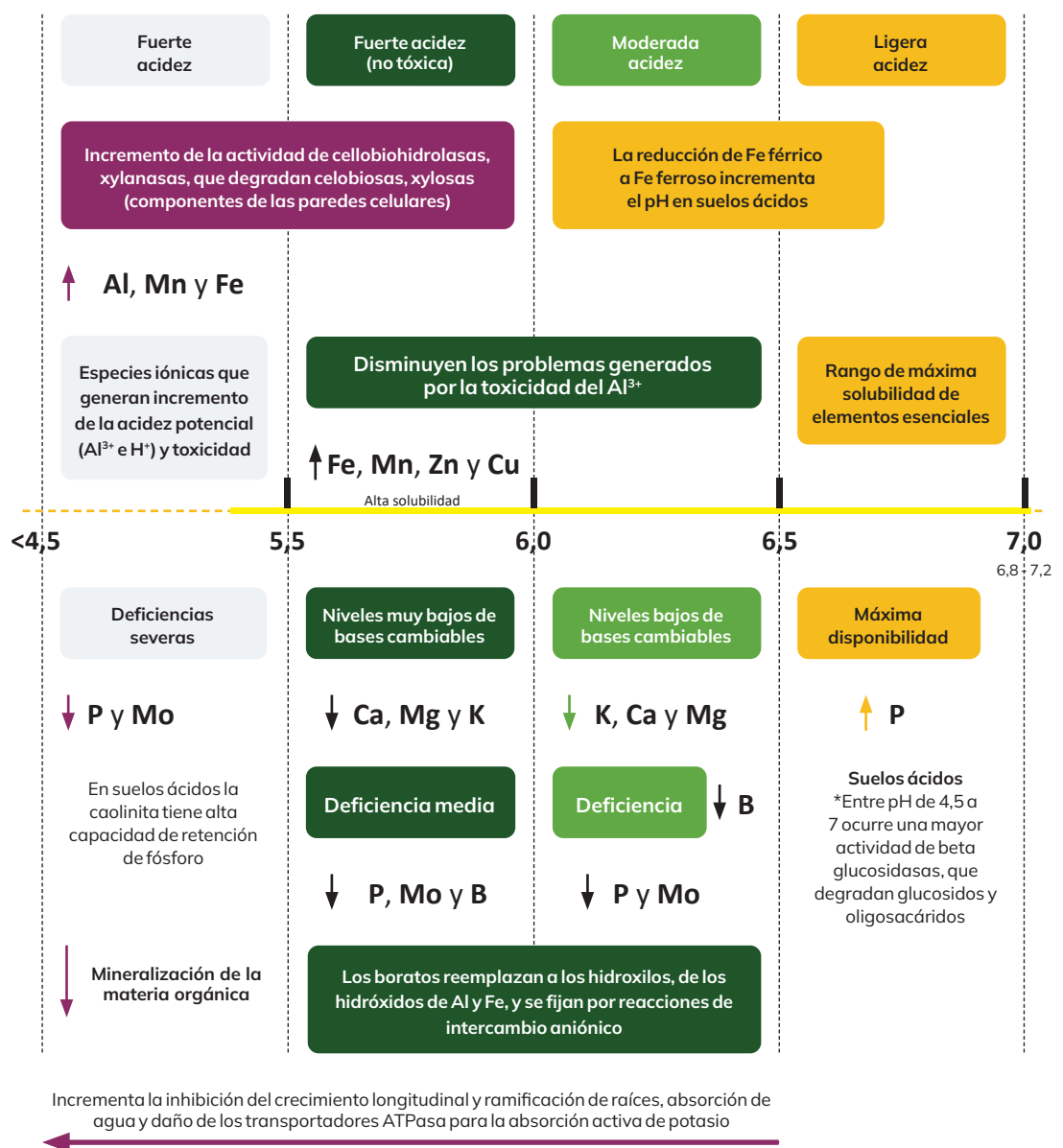
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 41,7 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 55,2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de palto es 55,2 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 presentan 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).



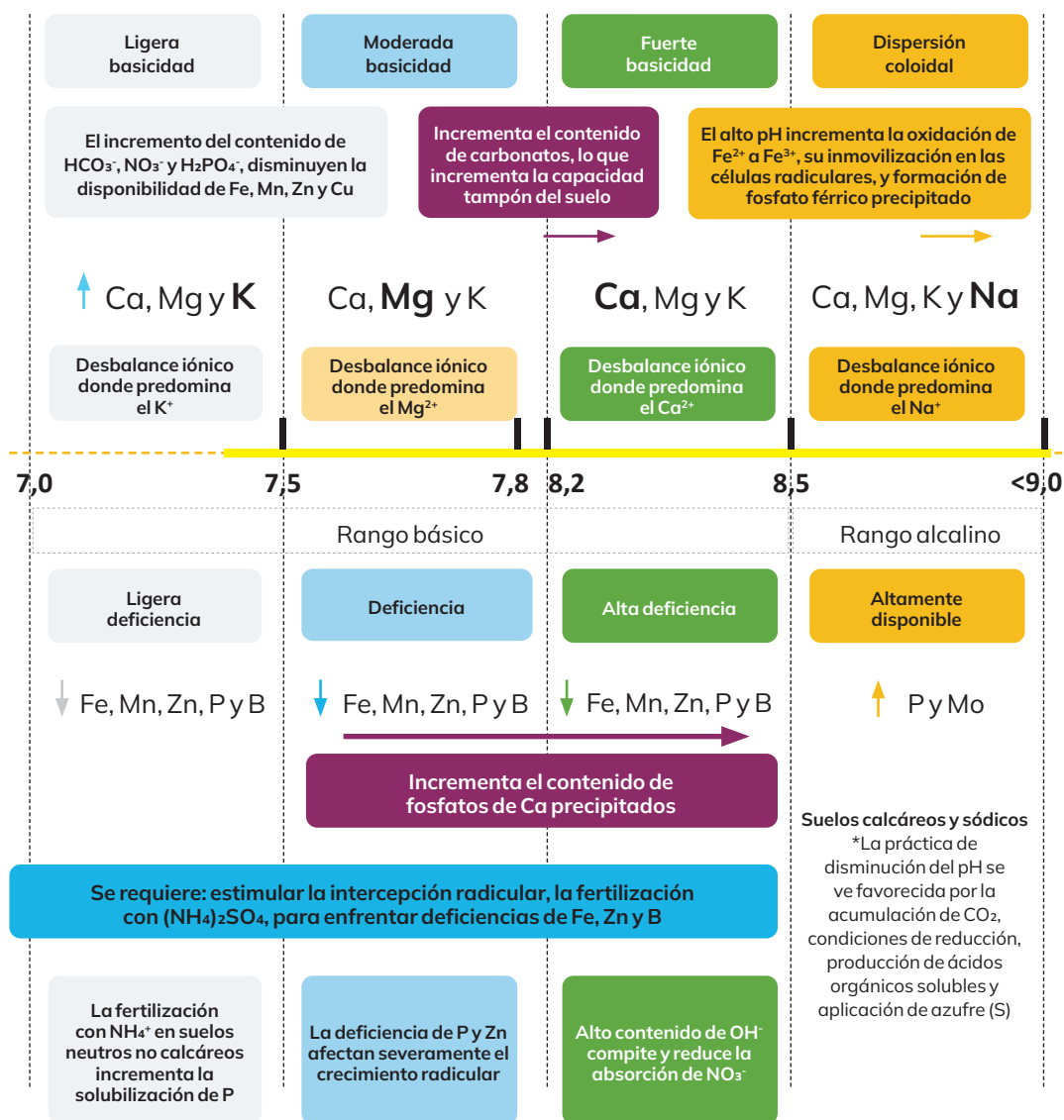


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 Virú

3.1. Ubicación

El muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental Chuin Alto (CE Chuin Alto), perteneciente a la EEA Virú, ubicado en el distrito de Paiján, provincia de Ascope, departamento de La Libertad (Figura 5), con una extensión total de 18,63 ha. El área se sitúa a 80 m s. n. m. con precipitaciones promedio anuales de hasta 30 mm y temperaturas medias que varían entre 18 y 24 °C.

En la EEA Virú se realizan trabajos de investigación, desarrollo tecnológico, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios a los agricultores de la región La Libertad. Los cultivos priorizados para estas actividades son: palto (*Persea americana* Mill.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) y arroz (*Oryza sativa* L.) (Cruz-Luis et al., 2025).

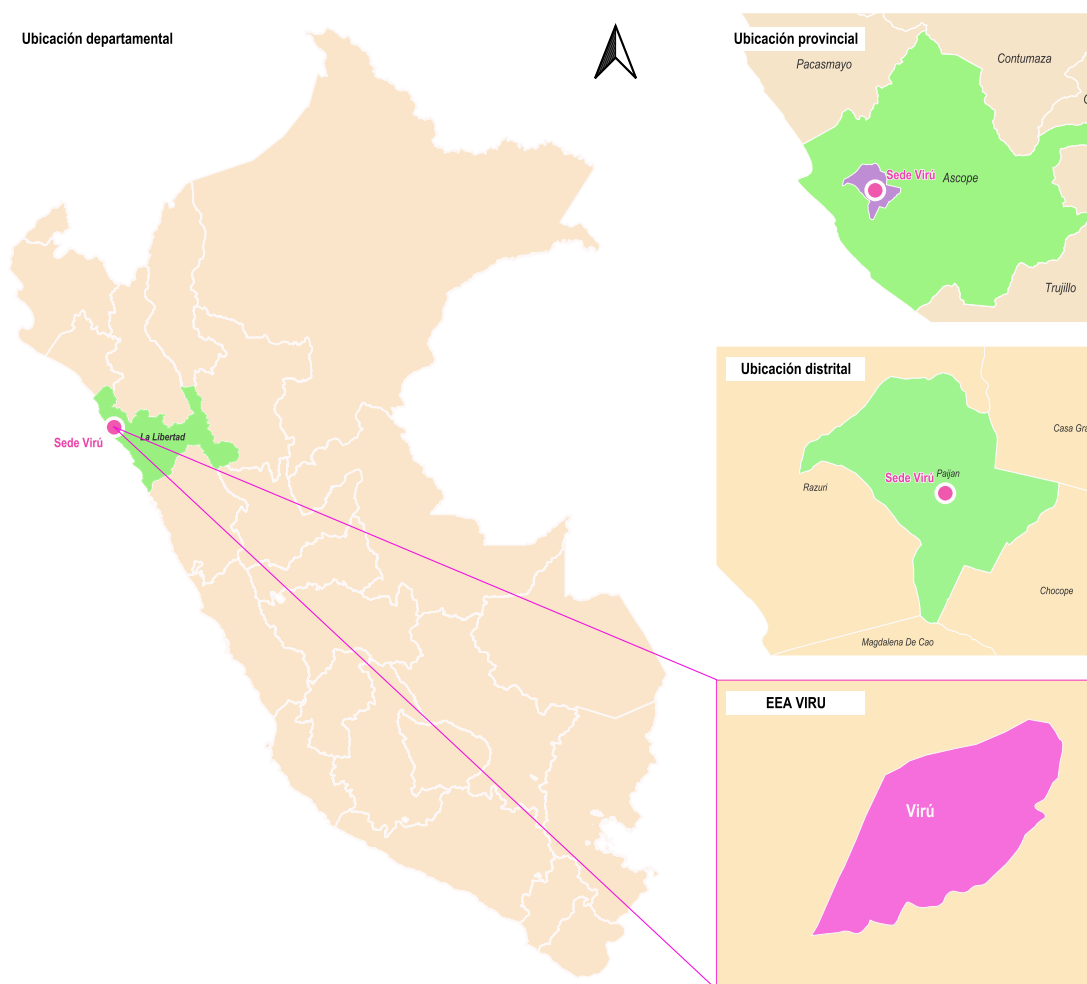


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Chuin Alto de la EEA Virú

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas del CE Chuin Alto, 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).

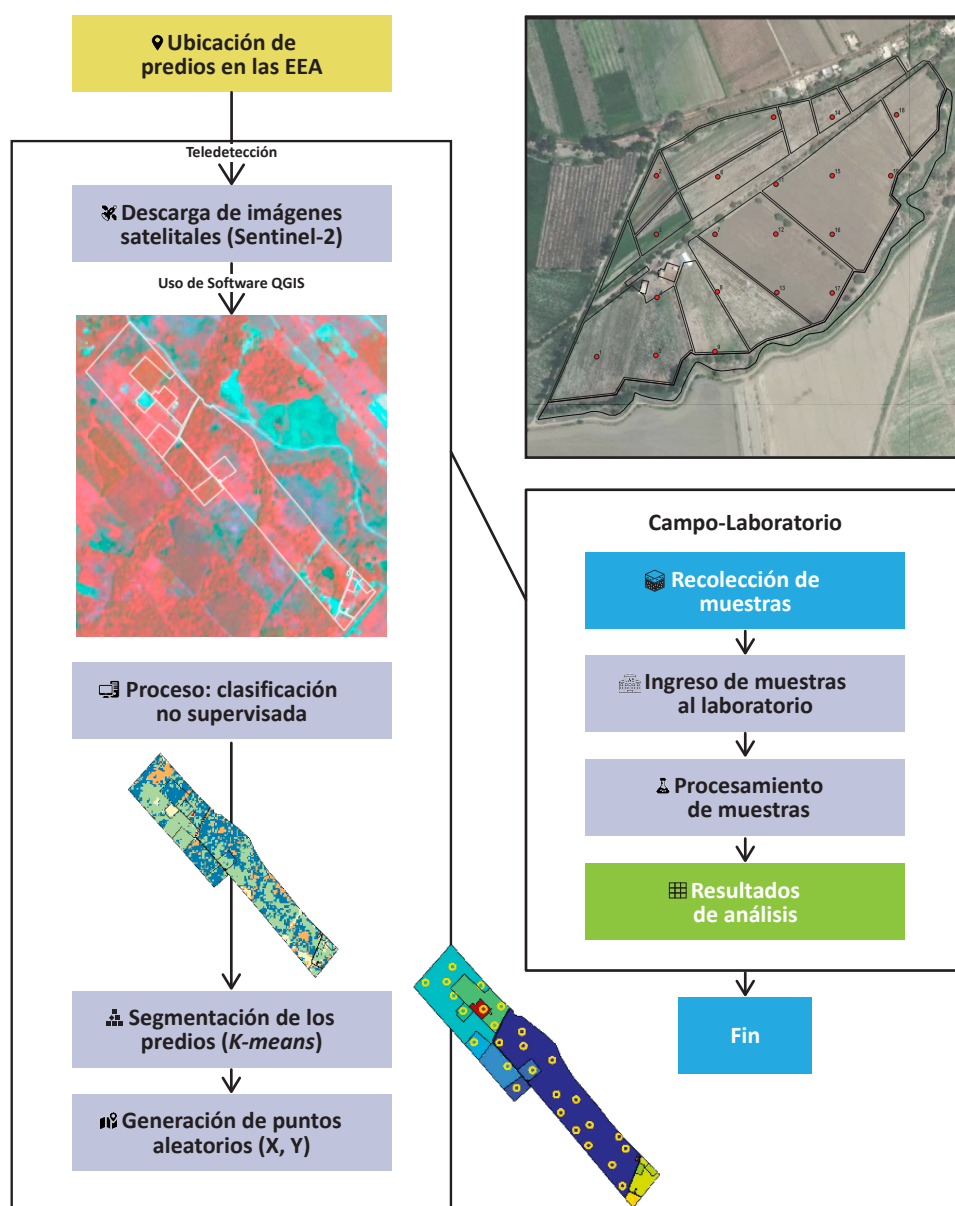


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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

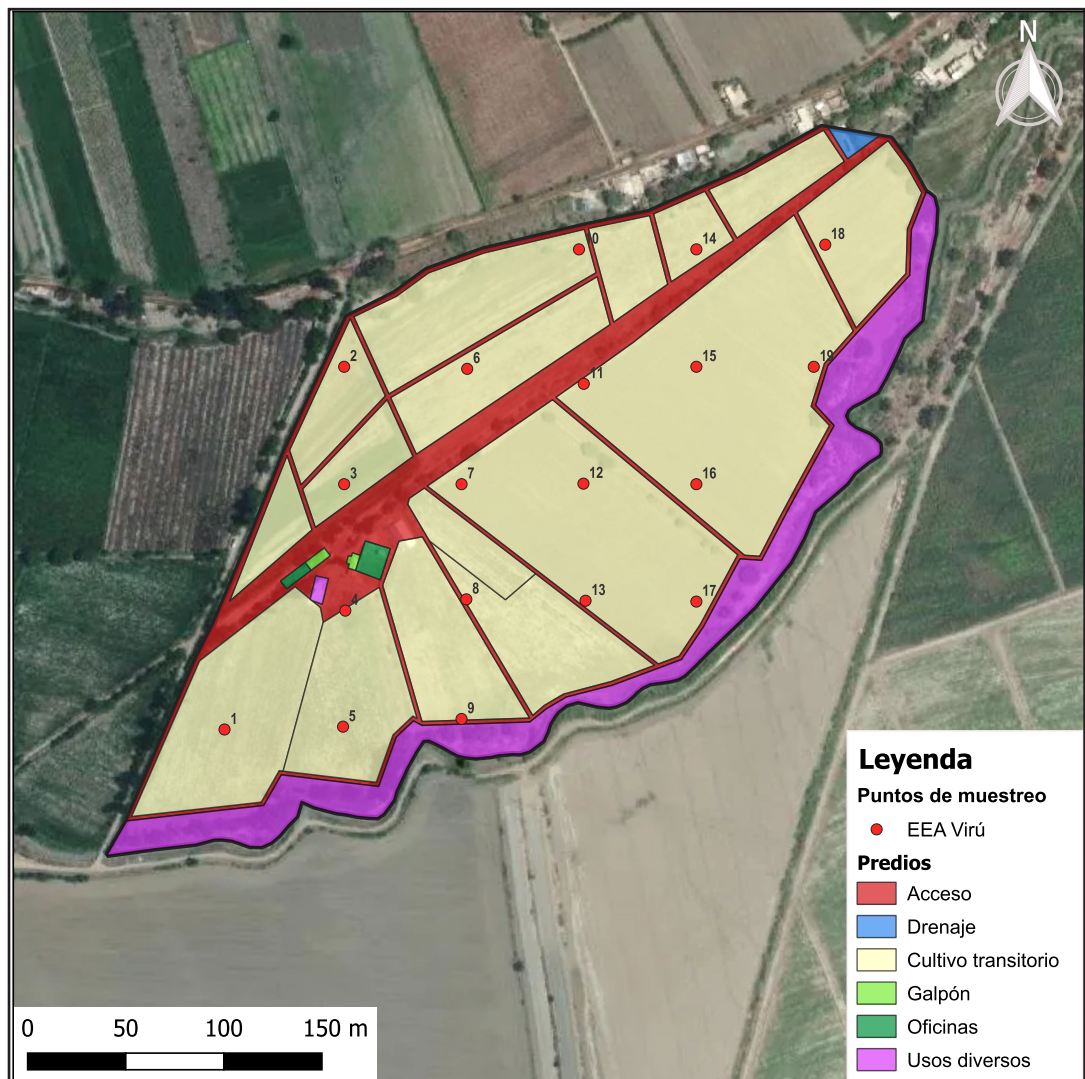


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en el Centro Experimental Chuin Alto

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 19 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

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



Figura 8. Proceso del muestreo de suelos. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta 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 Vista Florida 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)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los suelos evaluados del CE Chuin Alto presentan en promedio una textura franco arcilloso arenoso (57,35 % arena; 22,38 % arcilla y 20,27 % limo). En la fracción arena, su alta desviación estándar (SD = 9,32 %) refleja una variabilidad moderada en la composición textural, el coeficiente de variación (CV = 16,26 %) indica homogeneidad relativa, y su distribución negativa (*Skewness* = -1,33) sugiere mayor concentración de muestras con contenidos altos de arena. En contraste, el limo y la arcilla presentan distribuciones con asimetría positiva (*Skewness* = 1,88 y 1,19, respectivamente) y una mayor variabilidad (CV = 29,80 % y 23,47 %, respectivamente), como se muestra en la Tabla 2.

El pH promedio de 7,57, con baja variación (CV = 2,29 %), indicó que se trata de suelos ligeramente alcalinos, condición común en zonas áridas con limitado lavado de sales. La conductividad eléctrica (CE) presentó una media de 0,79 dS m⁻¹ y alta variabilidad (CV = 63,14 %), lo que sugiere la presencia de áreas con incipientes problemas de salinidad. El contenido promedio de materia orgánica (2,26 %) mostró una variación muy alta (CV = 131,82 %), con valores mínimos de 0,30 % y máximos de 11,10 %, reflejando heterogeneidad marcada, posiblemente asociada a diferencias en manejo o uso del suelo. El carbonato de calcio (CaCO₃) alcanzó una media de 5,37 %, típica de suelos calcáreos de la costa norte.

Respecto a los nutrientes, el fósforo disponible (29,65 mg kg⁻¹, CV = 40,51 %) presentó una disponibilidad moderada a alta, aunque con notable variabilidad espacial. Y el potasio disponible (226,26 mg kg⁻¹, CV = 66,46 %) mostró una alta dispersión, lo que sugiere diferencias marcadas en la fertilidad del suelo relacionadas con el manejo o el tipo de material parental.

En conjunto, los resultados reflejan suelos de textura media, alcalinos, con contenidos variables de sales y materia orgánica, lo cual requiere un manejo diferenciado según las condiciones locales para mantener la productividad agrícola. Ante esta heterogeneidad química y textural, resulta esencial aplicar herramientas geoestadísticas que permitan mapear patrones espaciales con mayor precisión, optimizar el muestreo y guiar un manejo agronómico específico.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	<i>Skewness</i>
Arena	%	57,35	9,32	16,26	60,30	32,20	67,60	-1,33
Limo	%	20,27	6,04	29,80	18,20	14,10	39,70	1,88
Arcilla	%	22,38	5,25	23,47	21,70	14,20	37,80	1,19
pH	und	7,57	0,17	2,29	7,50	7,30	8,00	0,77
CEe	dS m ⁻¹	0,79	0,50	63,14	0,68	0,15	1,86	0,51
MO	%	2,26	2,98	131,82	1,50	0,30	11,10	2,22
CaCO ₃	%	5,37	1,08	20,11	5,50	3,20	7,30	-0,28
P disp.	mg kg ⁻¹	29,65	12,01	40,51	27,60	17,40	59,60	1,24
K disp.	mg kg ⁻¹	226,26	150,37	66,46	141,20	75,80	550,70	0,84

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: coeficiente de asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, CaCO₃: carbonato de calcio, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible.

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 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.

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

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

La caracterización geoestadística de los suelos del CE Chuin Alto evidenció la presencia de estructuras espaciales diferenciadas entre las variables evaluadas, con niveles de dependencia y capacidad predictiva variables según la propiedad edáfica analizada. En particular, el pH mostró una estructura espacial altamente definida ($R^2 = 0,998$), ajustándose a un modelo esférico con un rango de 192,59 m, lo que indica una notable continuidad espacial y alta confiabilidad en su interpolación. De manera similar, la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) presentó un ajuste moderado ($R^2 = 0,435$) bajo un modelo exponencial, sugiriendo una dependencia espacial aceptable para su representación cartográfica.

Entre las variables asociadas a la fertilidad, la materia orgánica (MO) alcanzó un nivel de dependencia espacial moderado ($R^2 = 0,648$), mientras que el fósforo disponible (P disp.) evidenció una estructura espacial consistente ($R^2 = 0,535$) modelada mediante una función esférica. En contraste, el potasio disponible (K disp.) presentó una baja capacidad predictiva ($R^2 = 0,248$), lo que sugiere una mayor influencia de factores locales o variabilidad a microescala que limita su modelamiento geoestadístico.

El contenido de carbonatos (CaCO_3) mostró un comportamiento espacial moderado ($R^2 = 0,575$), ajustándose a un modelo gaussiano con un rango cercano a los 293 m, lo que indica una distribución relativamente continua en el paisaje. Por su parte, las fracciones texturales presentaron comportamientos diferenciados: la arena ($R^2 = 0,620$) evidenció una estructura espacial bien definida, mientras que la arcilla ($R^2 = 0,223$) y el limo ($R^2 = 0,233$) mostraron una menor dependencia espacial, reflejando una mayor heterogeneidad en su distribución.

En conjunto, los resultados indican que variables como el pH, la materia orgánica, el fósforo disponible, el contenido de carbonatos y la fracción arena presentan las condiciones más favorables para la delimitación de unidades de manejo debido a su mayor grado de estructuración espacial. En contraste, variables como el potasio disponible, fracción limo y arcilla presentan limitaciones para su interpolación precisa. Estos hallazgos respaldan la aplicación de herramientas geoestadísticas como base para el diseño de estrategias de manejo sitio-específico en la EEA Virú.

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

Variable	Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
pH	<i>Spherical</i>	0,02	0,03	192,59	0,17	0,998
CEe	<i>Exponential</i>	0,01	0,02	292,6	0,031	0,435
MO	<i>Exponential</i>	0,35	0,4	190,73	0,64	0,648
P disp.	<i>Spherical</i>	0,36	1,62	230,72	1,905	0,535
K disp.	<i>Spherical</i>	1,29	3,04	215,69	1,468	0,248
CaCO ₃	<i>Gaussian</i>	0,6	0,74	293,38	0,172	0,575
Arena	<i>Gaussian</i>	0,25	0,84	295,2	0,784	0,62
Arcilla	<i>Gaussian</i>	0,18	0,39	197,01	0,658	0,223
Limo	<i>Gaussian</i>	0,13	0,72	185,65	0,819	0,233

RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica, CaCO₃: carbonato de calcio, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible.

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Virú (Figuras 9-17) evidencian patrones espaciales definidos y gradientes claros en las principales propiedades edáficas, basados en una alta predictibilidad de sus modelos estadísticos. Esta organización espacial permite identificar zonas diferenciadas de manejo agronómico dentro del área experimental, sustentando el diseño de estrategias sitio-específicas en la fertilización y otras prácticas de manejo del suelo.

La textura del suelo presenta una disposición heterogénea, con predominio de suelos arenosos en gran parte del predio y sectores puntuales de mayor proporción de limo y arcilla. Estas variaciones determinan diferencias claves en la retención de agua y la dinámica de nutrientes. Así, las zonas con mayor contenido de arena requerirán una reposición más frecuente de nutrientes, mientras que en áreas limosas o arcillosas se podrán realizar aplicaciones de fertilizantes más espaciadas y de forma eficiente.

El pH exhibe un gradiente espacial suave, con valores próximos a la neutralidad y ligeros aumentos hacia regiones específicas del campo. Este patrón sugiere condiciones químicas favorables para la absorción de la mayoría de los nutrientes esenciales, aunque requiere monitoreo en zonas puntuales para evitar posibles efectos sobre la disponibilidad de micronutrientes en sectores con pH más alto.

La conductividad eléctrica y la materia orgánica muestran también distribuciones espaciales diferenciadas. La CE alcanza mayores valores en ciertas zonas asociadas a acumulación salina local, relevante para la gestión del riego y la identificación de áreas con potenciales restricciones por salinidad. Por su parte, la MO, con una estructura intermedia de dependencia espacial, ocurre en mayor concentración en zonas determinadas y aporta una mayor capacidad de retención y fertilidad natural al suelo de estos sectores.

En cuanto a los nutrientes, tanto el fósforo como el potasio disponible presentan gradientes marcados, producto de la interacción entre la textura, el historial de manejo y la movilidad propia de cada elemento. El potasio disponible, en particular, muestra concentraciones más altas en zonas con mayor contenido de arena y mejor saturación de bases, facilitando la identificación de sectores donde se puede reducir la aplicación de fertilizantes potásicos sin comprometer el rendimiento.

El carbonato de calcio (CaCO_3) exhibe una distribución menos continua, con valores irregulares que reflejan la heterogeneidad del material parental y condiciones microambientales particulares. Esta variabilidad sugiere precaución al momento de planificar aplicaciones de enmiendas calcáreas en el campo.

En conjunto, los mapas edáficos del CE Chuin Alto ofrecen una base sólida para la zonificación agronómica y el uso racional de insumos. Las variables con mayor estabilidad espacial (fracción textural arena, pH, P disp., carbonatos y MO) permiten definir unidades homogéneas de manejo que facilitan la implementación de agricultura de precisión. La integración del análisis geoestadístico con la cartografía temática constituye una herramienta clave para avanzar hacia sistemas de producción más sostenibles y ajustados a la variabilidad espacial del suelo en la EEA Virú.

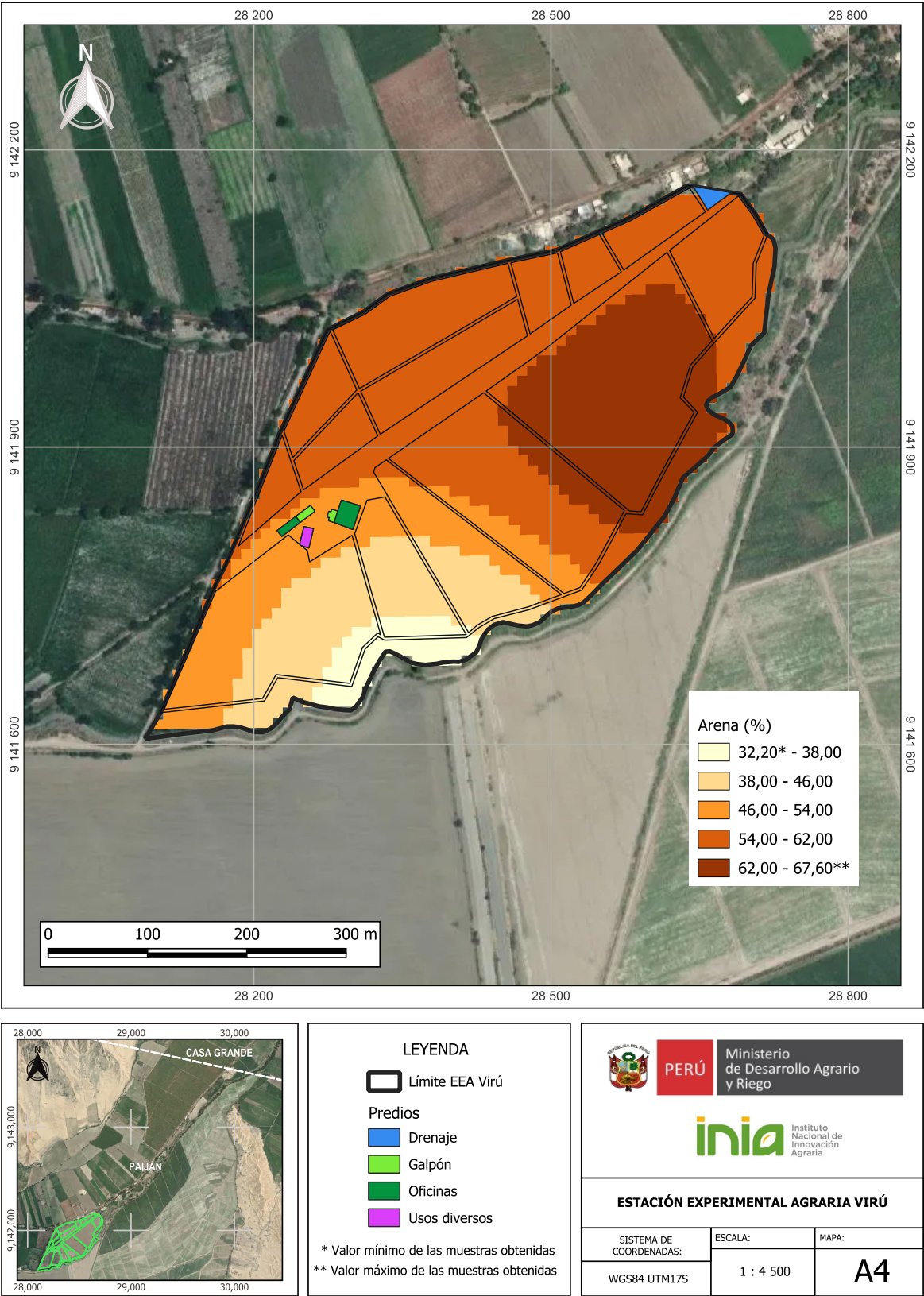


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

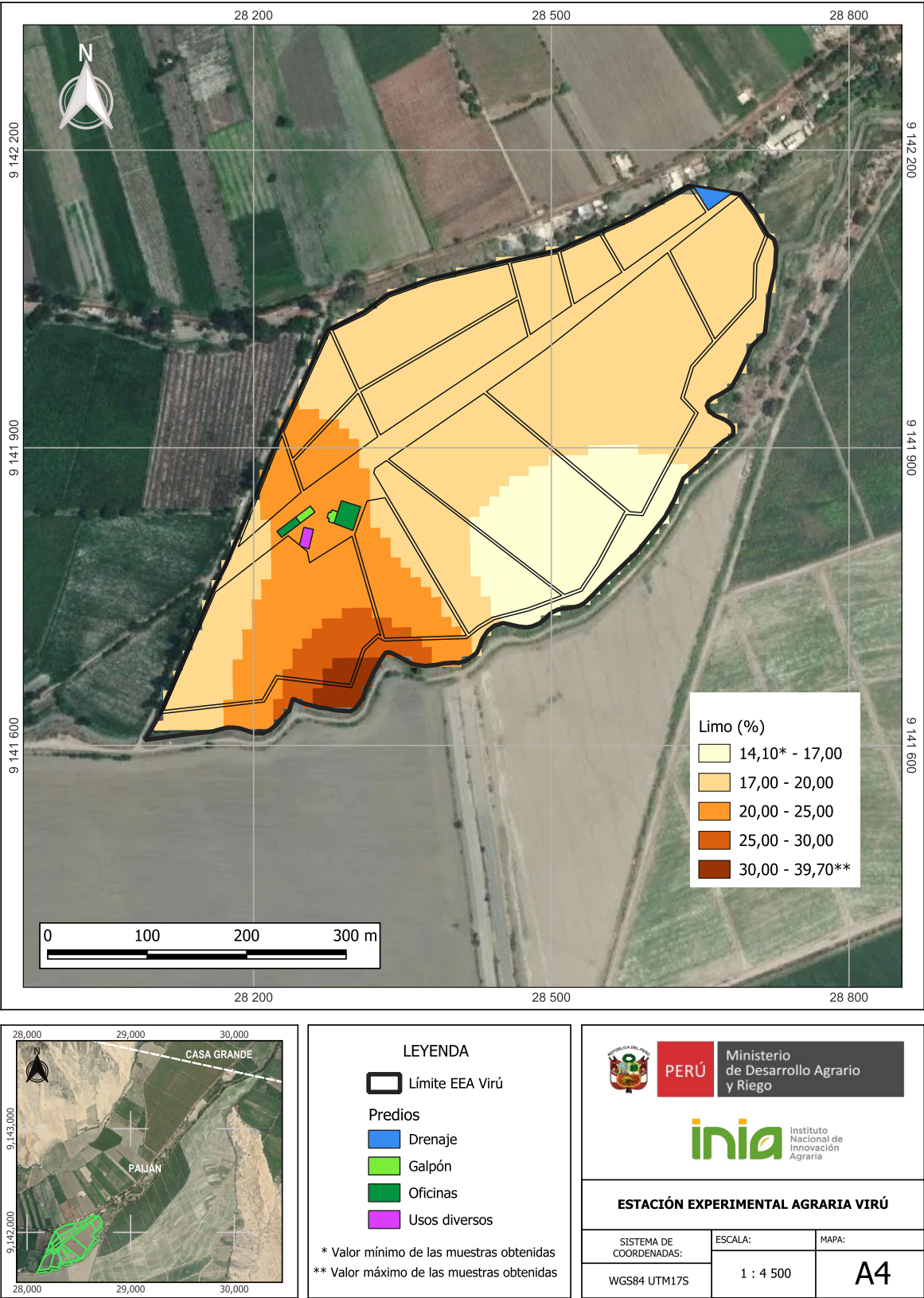


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

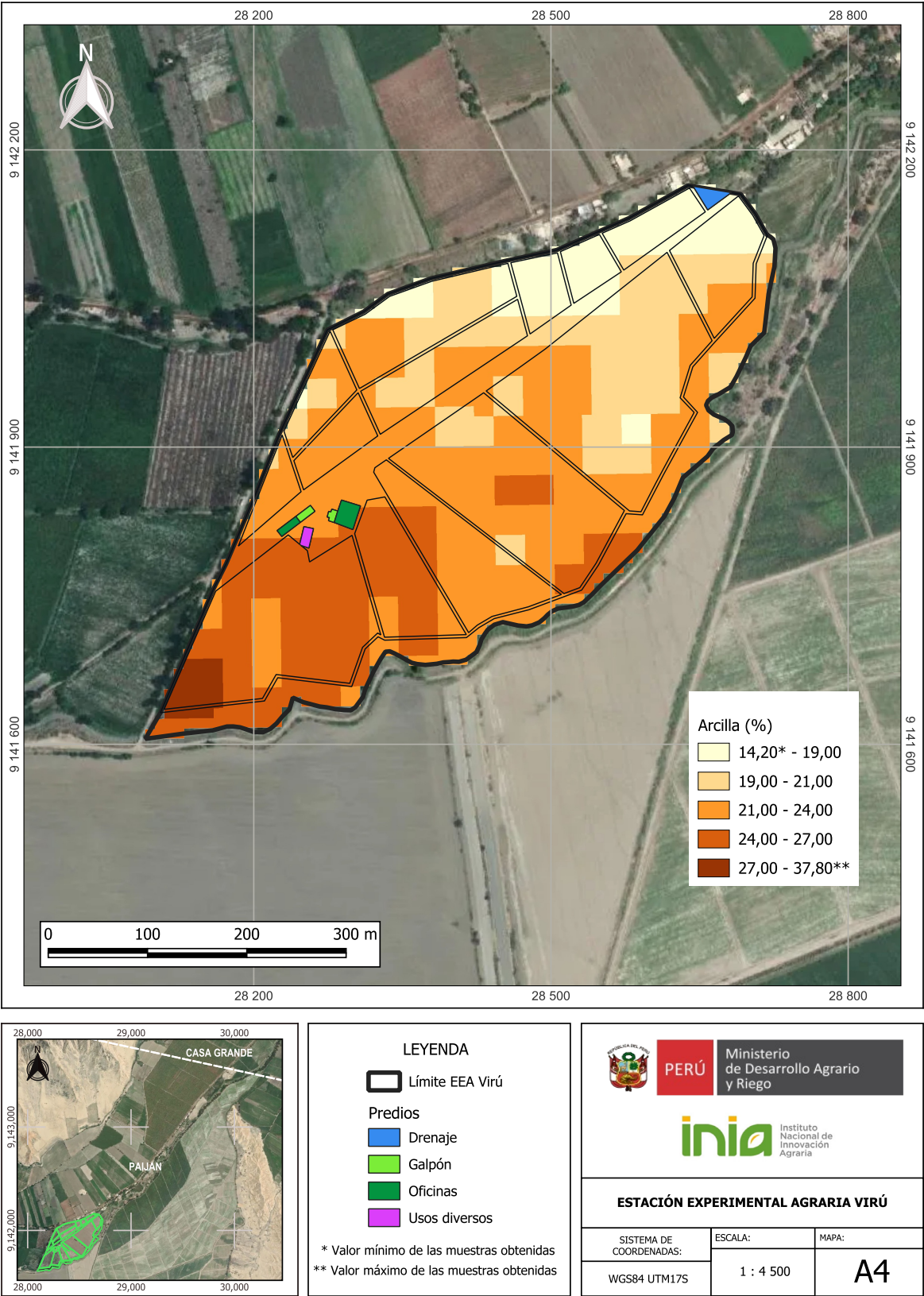


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

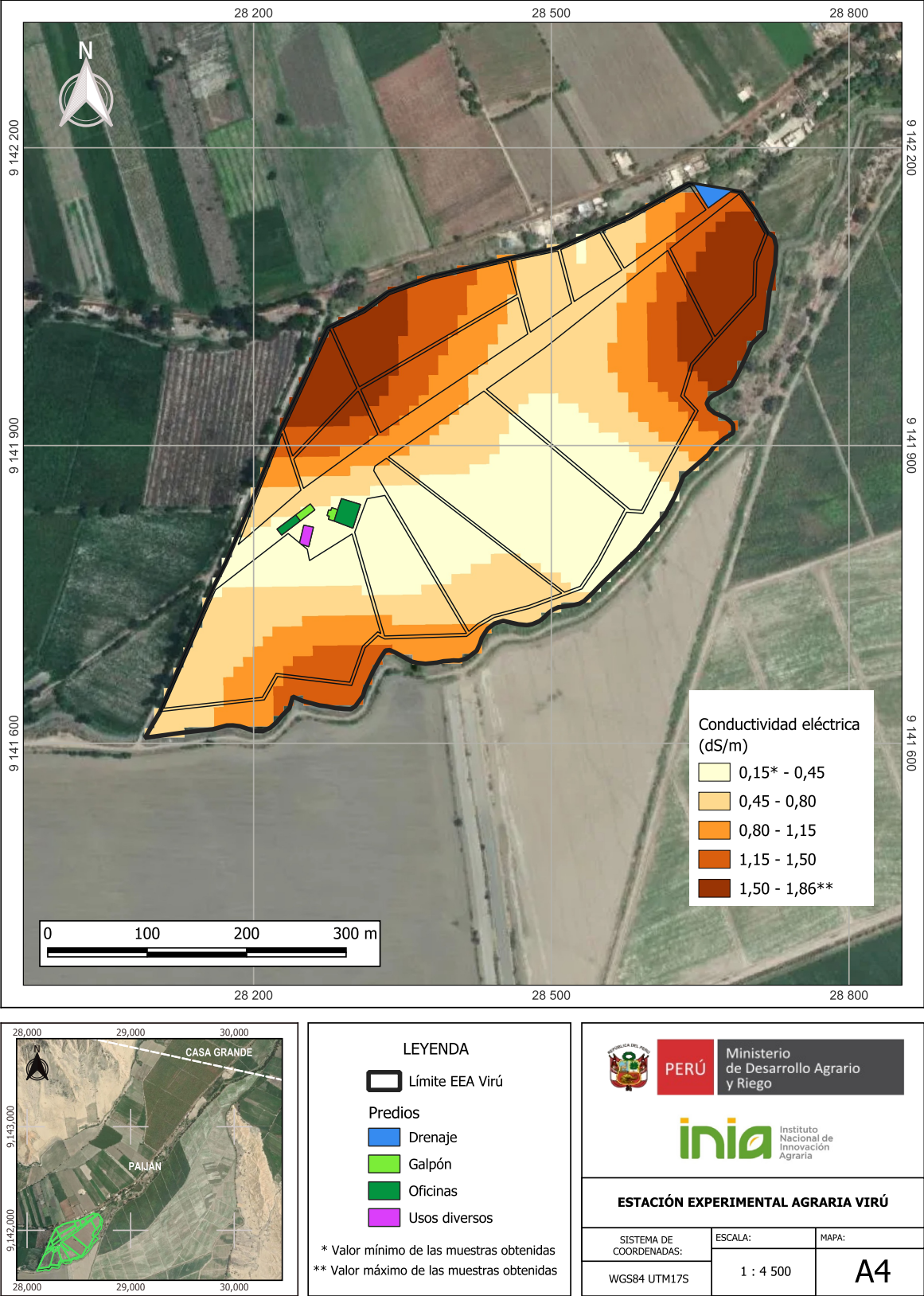


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

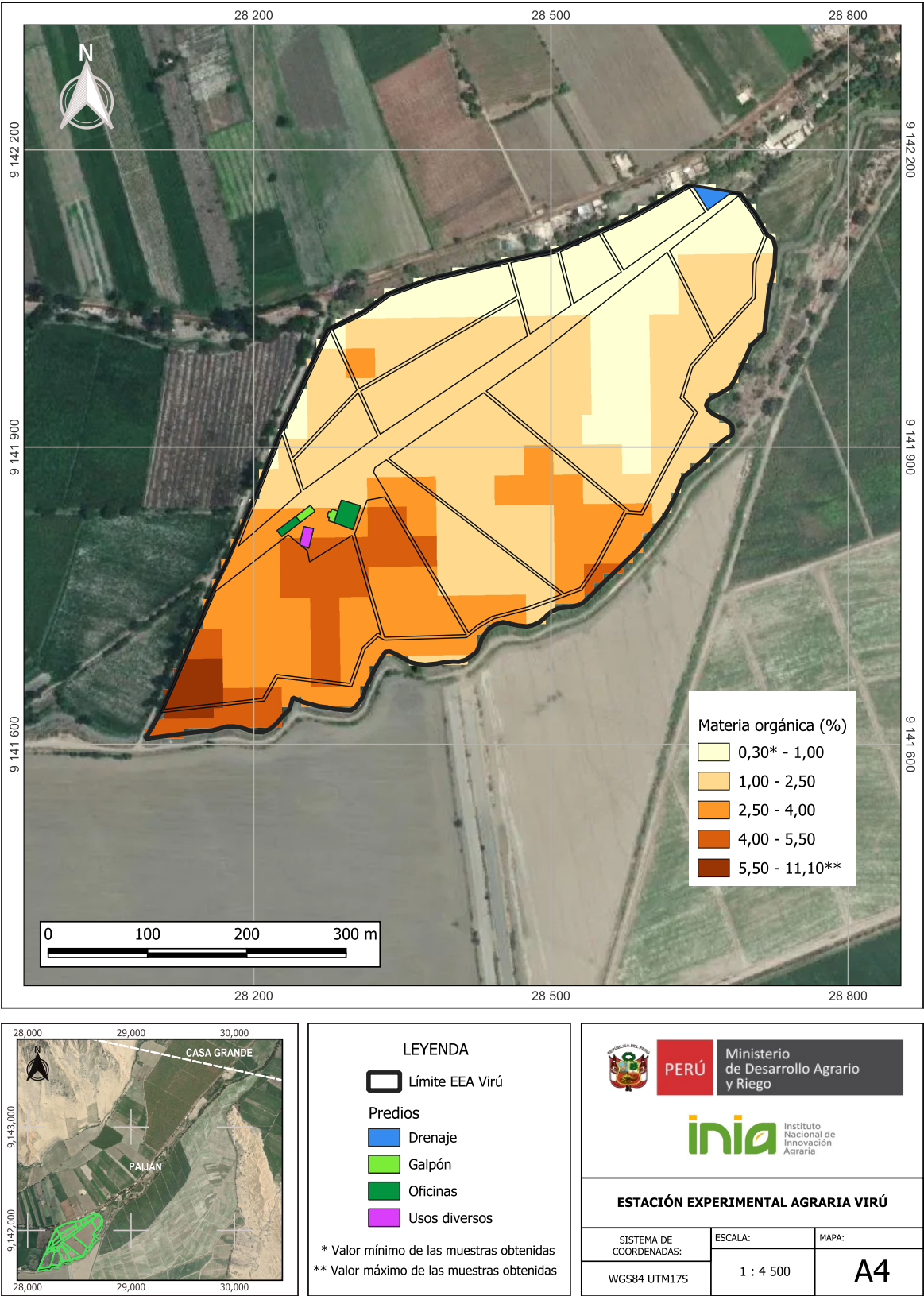


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

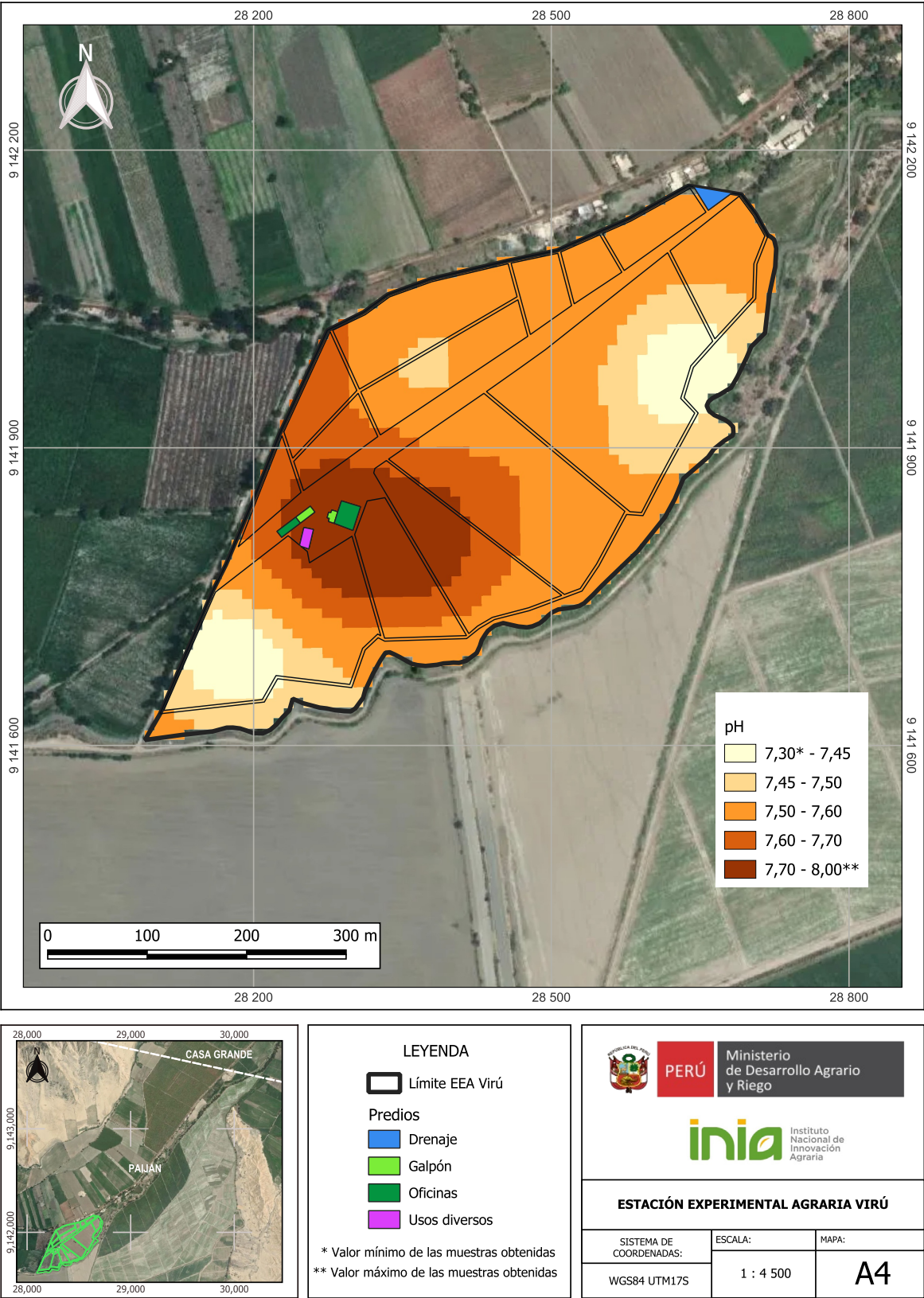


Figura 14. Mapa de variación espacial del pH

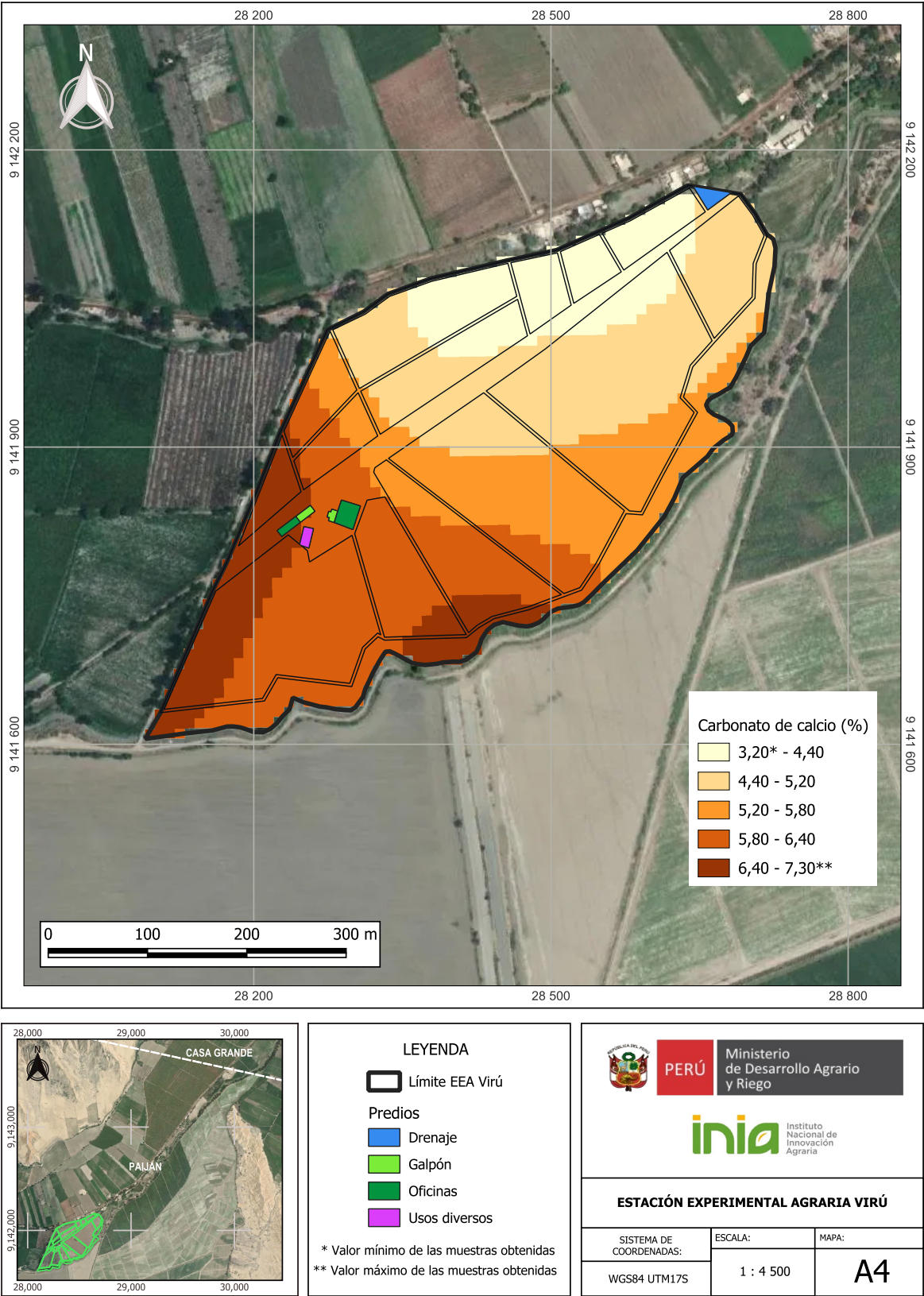


Figura 15 Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

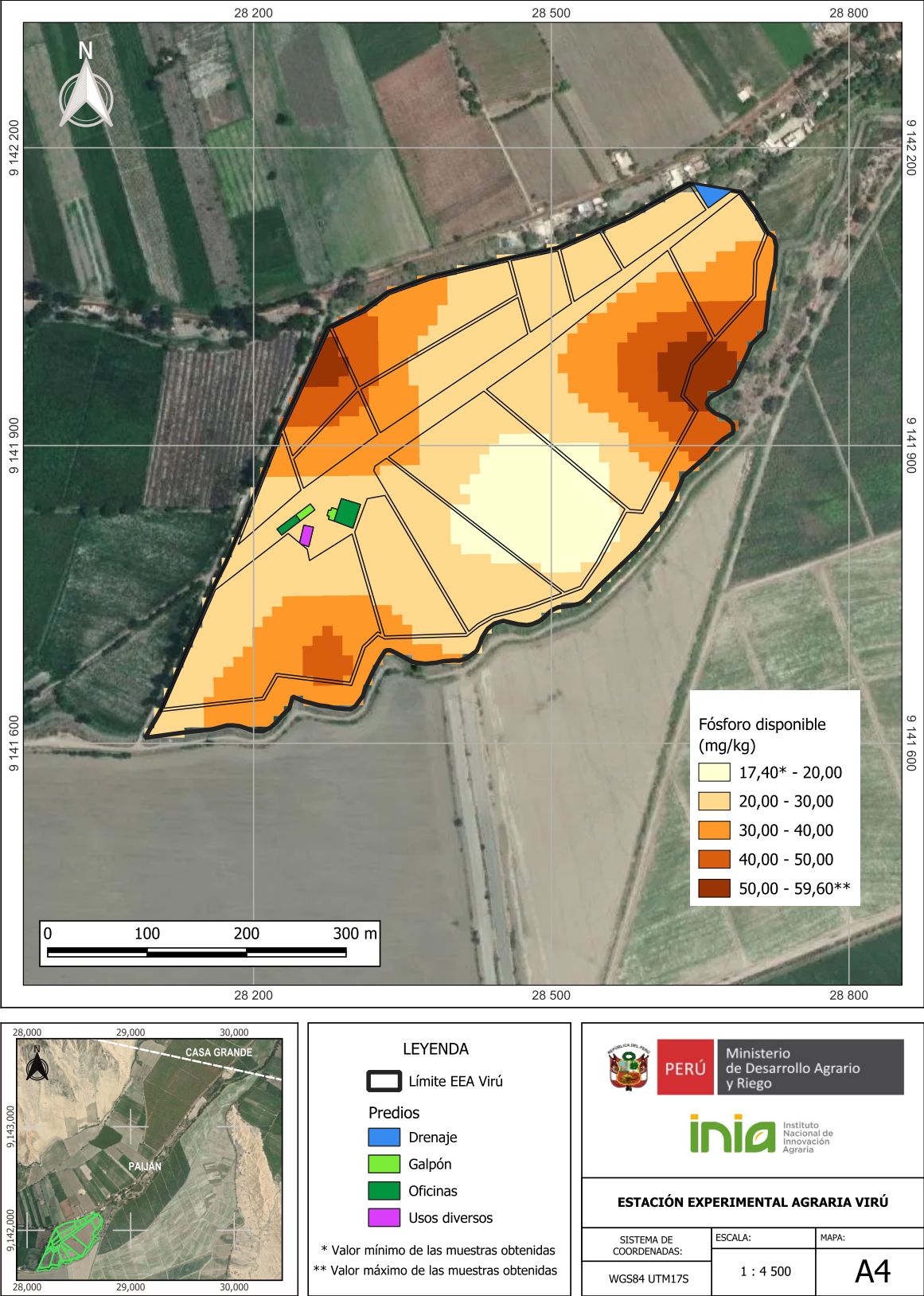


Figura 16. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

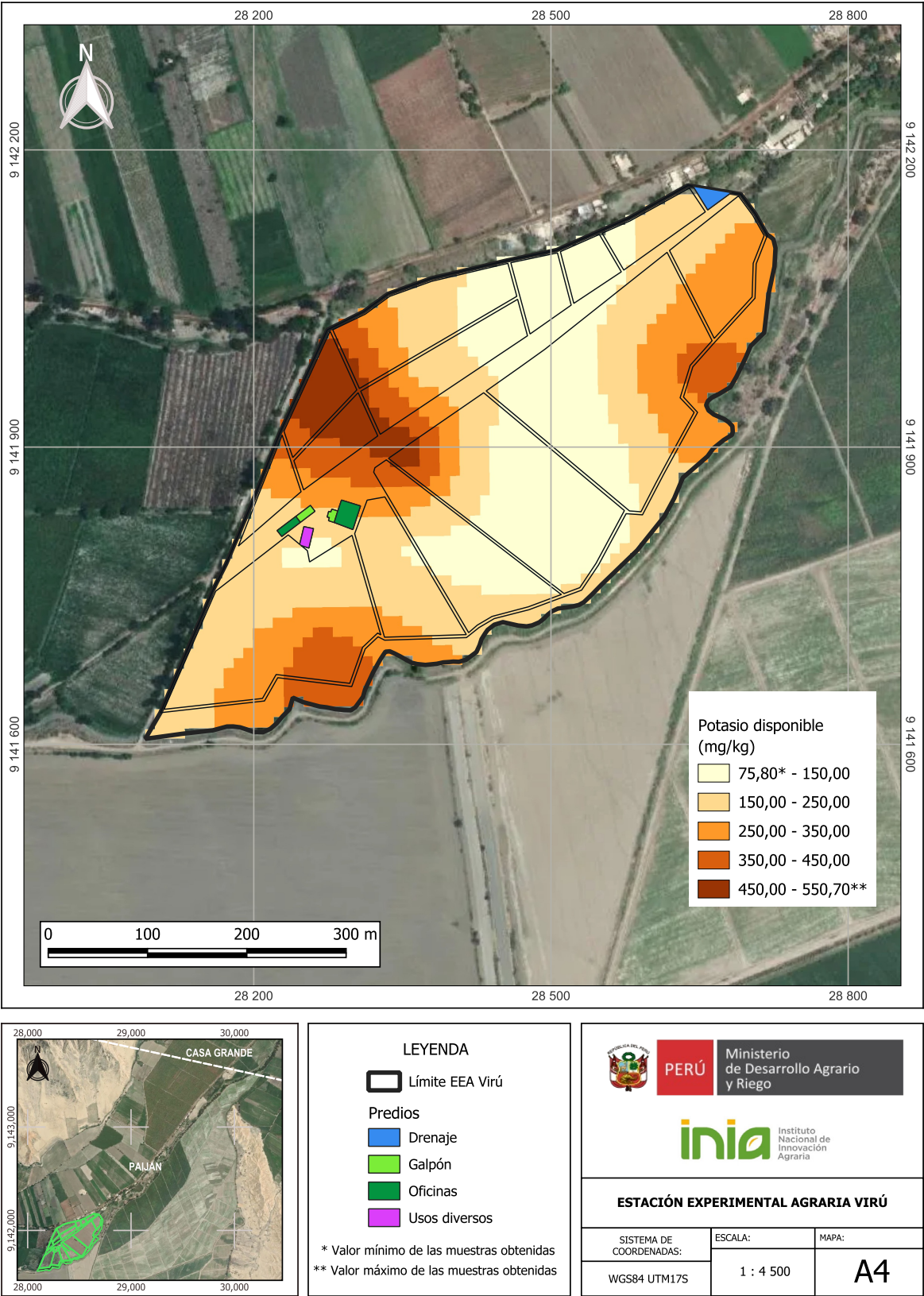


Figura 17. Mapa de variación espacial del potasio disponible



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

4.1. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.1.1. Fertilización de construcción para incrementar el P disponible

Existe una alta variabilidad entre los valores de fósforo disponible, que oscilan entre 17,40 y 59,60 mg kg⁻¹. Los indicadores geoestadísticos muestran que hay un ajuste moderado entre los valores observados y predichos a nivel espacial (RMSE = 1,905 mg kg⁻¹; R² = 0,535), lo que sugiere que las estimaciones de fertilización fosforada muestran una buena precisión. La heterogeneidad espacial del fósforo indica que en ciertas áreas este nutriente es limitante para el crecimiento vegetal, requiriendo fertilización fosfatada de mantenimiento, mientras que en otras podría haber disponibilidad suficiente o incluso en exceso, lo cual sugiere requerimientos de fertilización de suficiencia, para cultivos altamente exigentes. En consecuencia, el mapa de variación espacial del fósforo disponible en la EEA Virú permitió definir cinco zonas de manejo para el cultivo de maíz amarillo duro. La zona 1 presentó niveles moderados de fósforo disponible (17,4-20 mg kg⁻¹); la zona 2, niveles altos (20-30 mg kg⁻¹); mientras que las zonas 3 (30-40 mg kg⁻¹), 4 (40-50 mg kg⁻¹) y 5 (50-59,6 mg kg⁻¹) registraron niveles excesivos de este nutriente.

En este caso, se utilizará el valor mínimo de la zona 1 como ejemplo para el cálculo de los requerimientos de fertilización de mantenimiento en el cultivo de maíz amarillo duro. Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P por kg de suelo, y el rendimiento potencial es de 8 t ha⁻¹. De forma práctica, se considerará que con 17,4 mg kg⁻¹ se alcanza un rendimiento relativo de 80 %. El cálculo se realiza siguiendo la metodología descrita por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 17,4 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 8 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 6,4 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 6,4 \text{ t ha}^{-1} = 2,24 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 6,4 \text{ t ha}^{-1} + 2,24 \text{ t ha}^{-1} = 8,64 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 5,37 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 5,37 \text{ kg de P t}^{-1} \times 8,64 \text{ t ha}^{-1} = 46,39 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: finalmente, 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 30 %.

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

$$\text{RM de P} = \frac{46,39 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 154,63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 769,78 kg de fosfato diamónico (DAP) por hectárea, el cual permite cubrir el requerimiento de mantenimiento de fósforo para el cultivo de maíz amarillo duro.

4.1.2. Fertilización de mantenimiento y construcción para incrementar el K disponible

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 = 1,468 y $R^2 = 0,248$). Además, existe una alta variabilidad entre los valores de K del suelo con resultados entre 75,80 y 550,70 mg kg⁻¹. Está marcada heterogeneidad espacial indica que en ciertas áreas el potasio es limitante para el crecimiento vegetal, requiriendo fertilización potásica inmediata, mientras que en otras podría haber disponibilidad suficiente o incluso exceso, generando desbalances catiónicos en el complejo de cambio. De esta manera, el requerimiento de fertilización potásica sólo es posible realizarlo mediante un análisis del suelo sitio-específico.

En este caso, se tomará como ejemplo el valor de K extractable de 75,80 mg kg⁻¹ (mínimo) para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de maíz amarillo duro. Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 120 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 8 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 75,80 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %. El cálculo se realiza adaptando la metodología descrita por Quispe-Matos et al. (2025).

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 75,80 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 8 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 4 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 4 \text{ t ha}^{-1} = 1,4 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4 \text{ t ha}^{-1} + 1,4 \text{ t ha}^{-1} = 5,40 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 19,67 kg de K por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 19,67 \text{ kg de K t}^{-1} \times 5,40 \text{ t ha}^{-1} = 106,22 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 12. El RM integra el requerimiento de K con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de K del 70 %.

$$\text{RM de K} = \frac{\text{Requerimiento de K}}{\text{Eficiencia de uso del K}} \dots(12)$$

$$\text{RM de K} = \frac{106,22 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0,70} = 151,74 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 4 kg de K por hectárea para incrementar 1 mg de K por kg del suelo, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 10 mg de K por kg de suelo.

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

Entonces el plan de fertilización para la primera campaña se estima de la siguiente manera:

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 151,74 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 191,74 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 383,48 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio, el cual tiene una riqueza de 60 % de K₂O. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de cacao.

Por otro lado, es importante considerar que en los suelos con niveles muy altos y excesivos de potasio disponible (150-550,70 mg kg⁻¹) es posible que ocurran desequilibrios catiónicos, en desmedro de los niveles de magnesio y calcio, lo que se debe tener en cuenta en la interpretación de análisis complementarios de cationes básicos. Además, se debe tener en consideración el análisis de la CIC total del suelo, para evaluar si el alto nivel de K en estas zonas coincide con altos niveles de Mg²⁺ y Ca²⁺, debido a una elevada fertilidad potencial de los suelos.

4.2. pH del suelo

Los indicadores geoestadísticos del pH muestran un valor de *Nugget* (C_0) muy bajo (0,02), indicando ausencia de variabilidad espacial a escalas menores que la distancia de muestreo. Esto sugiere que la variabilidad observada del pH se encuentra completamente estructurada espacialmente. Por su parte, el *Sill* ($C_0 + C$) presenta un valor bajo (0,03), reflejando una baja variabilidad total del pH en la zona de estudio. Este aspecto es relevante para el manejo del suelo, dado que el pH influye directamente en la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes. Asimismo, el RMSE del pH presentó un valor bajo, lo cual es significativo considerando que la escala de pH va de 0 a 14; esto sugiere que, aunque la estructura espacial es clara, puede tener un margen de error. Además, el modelo esférico explica el 99 % de la variabilidad espacial del pH ($R^2 = 0,99$), lo que evidencia un ajuste muy alto del modelo.

El pH presenta un patrón espacial fuerte y altamente predecible, con un alcance aproximado de 192,59 m, lo que indica una amplia zona de influencia espacial. El amplio alcance del modelo permite generar un mapa de variación espacial del pH de forma confiable (Figura 14) y sugiere que, para esta variable, podrían emplearse densidades de muestreo relativamente menores en futuros estudios sin perder precisión en la interpolación espacial. Desde el punto de vista agronómico, el mapa permite diferenciar 5 zonas con diferente riesgo de alcalinidad y deficiencia de micronutrientes. La zona 1 presenta riesgo bajo (7,3-7,45); la zona 2 presenta riesgo moderado (7,45-7,50); la zona 3 presenta riesgo alto (7,5-7,6); la zona 4 y 5 presentan muy alto riesgo (7,6-8,0). En estas zonas se recomienda aplicar fertilización con micronutrientes de manera foliar o de forma edáfica con quelatos de Fe, Mn y Zn, a dosis crecientes en función al nivel de riesgo.





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.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/91_Replenishing_soil_fertility_in_africa.pdf
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>

- 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. *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/>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Ministerio del Ambiente. (2009). *Indicadores Ambientales La Libertad*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/indicadores-ambientales-libertad>

- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (2025). *Reporte mensual de comercio regional, diciembre 2025*. <https://www.gob.pe/institucion/mincetur/informes-publicaciones/7717686-reportes-de-comercio-reportes-regional-de-comercio-diciembre-2025>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). ASA Special Publications. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- 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. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejia-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA 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). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H. y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>

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

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



Ver nuestro alcance
de acreditación



Ver nuestros servicios



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







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

ISBN: 978-9972-44-273-5



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

      @INIAPeru