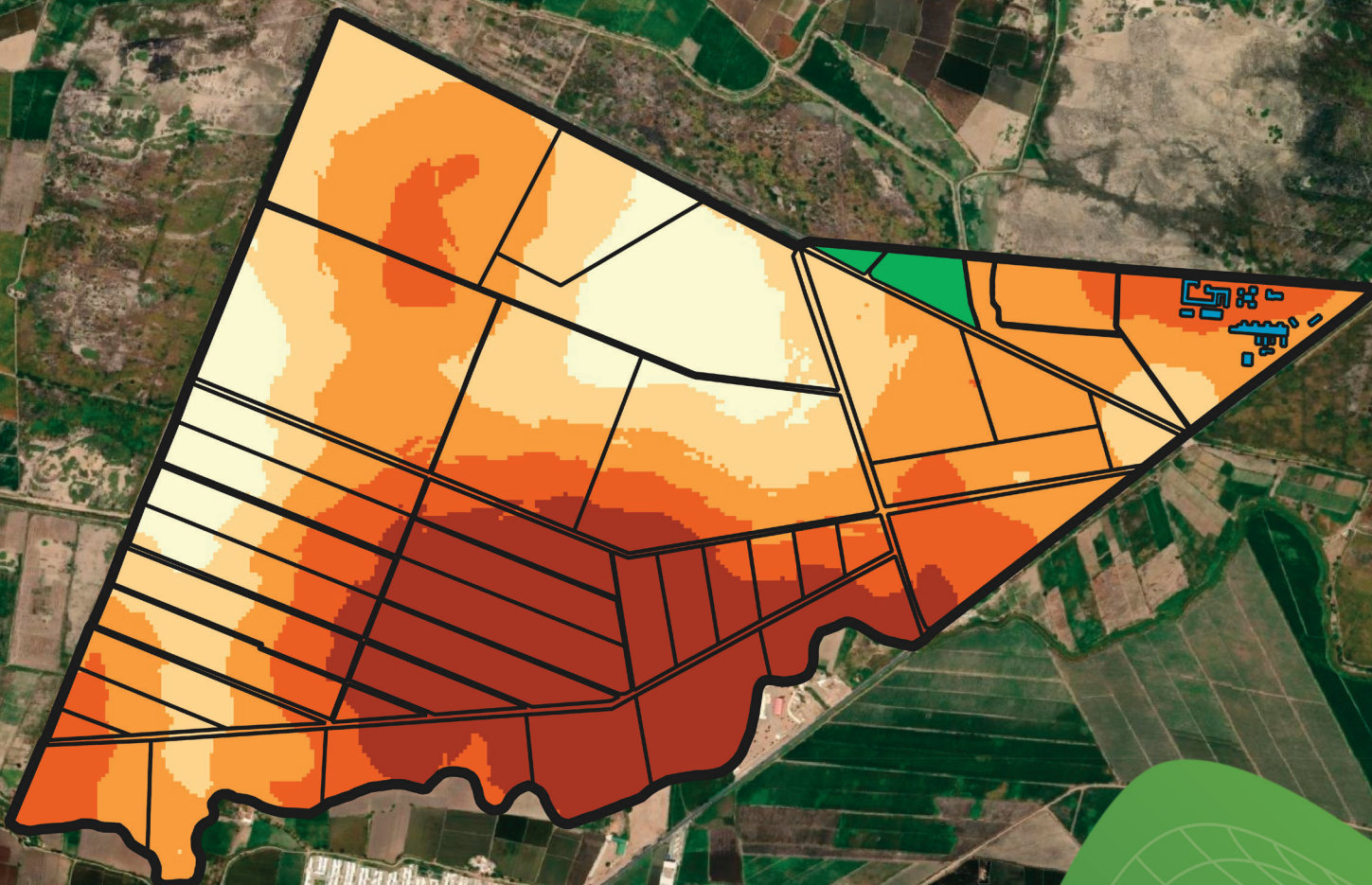


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Vista Florida



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 Vista Florida



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA VISTA FLORIDA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Febrero, 2026

Publicado:

Febrero, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-240-7

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° 2026-01104

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rosa K. Arroyo-Isuiza, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Albert E. Fernandez-Puquio, Mickel Palomino-Arias, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña; Anthony L. Peralta-Guzmán / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante

Tabla de contenido

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Principios fundamentales del análisis de suelos	11
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	11
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	11
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	14
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	21
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	23
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Vista Florida	25
3.1. Ubicación de la EEA Vista Florida	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	34
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	36
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Vista Florida	51
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	51
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	53
4.3. El pH del suelo	56
5. Referencias bibliográficas	59



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria y producción de semillas, 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 CUI N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

La variabilidad espacial de la fertilidad del suelo condiciona la productividad agrícola, la eficiencia en el uso de insumos y la sostenibilidad de los sistemas productivos, especialmente en ambientes heterogéneos. Los enfoques convencionales de análisis, basados en promedios o evaluaciones puntuales, resultan insuficientes para capturar esta heterogeneidad, lo que limita la toma de decisiones agronómicas precisas. En este contexto, la aplicación de modelos geoestadísticos y sistemas de información geográfica (SIG) permite caracterizar e interpretar los patrones espaciales de las propiedades edáficas, proporcionando información técnica clave para el manejo diferenciado, la conservación del suelo y la planificación eficiente de la fertilización.

El presente documento, “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Vista Florida”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada y aplicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico exacto del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible. Esta publicación está dirigida a profesionales del sector agrario e investigadores interesados en mejorar la salud del suelo.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

En la EEA Vista Florida, las condiciones edáficas configuran un reto de manejo territorial que condiciona la respuesta de los cultivos. Los suelos predominantes en la estación son Leptosoles y Regosoles éutricos formados a partir de materiales litológicos heterogéneos (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996), y el clima se caracteriza por escasa precipitación y temperaturas moderadas (Cruz-Luis et al., 2025). Estas características predisponen a limitantes recurrentes de la fertilidad del suelo, como bajo contenido de materia orgánica, que reduce la capacidad de retención de humedad; el pH alcalino y presencia de carbonatos que afectan la disponibilidad de micronutrientes y del fósforo; la alta heterogeneidad espacial de macronutrientes, que dificulta la fertilización uniforme; y focos puntuales con problemas salinos y sódicos, que comprometen la estabilidad física y química del suelo. En conjunto, estos factores junto con prácticas de fertilización generalizadas reducen la productividad de los cultivos prioritarios y aumentan el riesgo de degradación del suelo (Correa et al., 2016).

Por ello, el presente documento propone el uso de la variación espacial de la fertilidad de los suelos como una estrategia de manejo, dado que permite identificar y mapear las limitantes dominantes a escala de la EEA Vista Florida y diseñar estrategias sitio-específicas de aplicación de enmiendas y fertilizantes. En este contexto, el análisis de la variabilidad espacial de las propiedades edáficas se presenta, como una herramienta esencial para orientar intervenciones precisas, tal como señalan los trabajos sobre cartografía y zonificación aplicadas al manejo agronómico (Heuvelink y Webster, 2012; Lark et al. 2017).

La intervención sobre la fertilidad del suelo de la EEA Vista Florida gana importancia cuando se articula con un estudio riguroso de la variación espacial de las propiedades del suelo: la cartografía y zonificación permiten identificar focos y gradientes de limitantes (baja materia orgánica, salinidad/sodicidad, variabilidad en P y K, restricciones por pH y alcalinidad) y traducir ese conocimiento en acciones dirigidas. Al conocer la distribución espacial de estas deficiencias en la fertilidad del suelo, es posible priorizar enmiendas orgánicas en las zonas que más lo requieren, aplicar correcciones químicas localizadas, implementar fertilización de tasa variable y diseñar prácticas de conservación de humedad adaptadas a cada zona, reduciendo así aplicaciones innecesarias, mitigando riesgos de degradación y mejorando la rentabilidad agronómica. Además, la zonificación facilita el establecimiento de redes de monitoreo específicas que permiten evaluar la efectividad de las medidas y detectar tendencias emergentes, aportando una base técnica para decisiones de manejo a mediano y largo plazo. En suma, integrar la evaluación espacial de la fertilidad del suelo en la planificación de la intervención no solo optimiza el uso de insumos, sino que refuerza la sostenibilidad ambiental y productiva (Heuvelink y Webster, 2012; Lark et al. 2017; de Valença, 2017; Correa et al., 2016).

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo evaluar la variación espacial de la fertilidad del suelo de la EEA Vista Florida, para generar información técnica que contribuya a la planificación agrícola y al fortalecimiento de los sistemas productivos de la región. Para ello, se plantea diagnosticar el estado actual de la fertilidad del suelo e identificar sus principales limitantes, elaborar mapas de variabilidad espacial de las propiedades edáficas que permitan reconocer diferencias en la calidad del recurso, y recomendar estrategias de manejo de la fertilidad orientadas a optimizar el uso de insumos, incrementar la productividad y promover la sostenibilidad de los sistemas productivos en la estación.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

El proceso de recomendación de fertilizantes mediante el análisis químico de suelos implica varios pasos discretos, pero en cierta medida interrelacionados. Estos pasos incluyen: el muestreo de suelos, el análisis químico, la interpretación de los resultados analíticos y el desarrollo de recomendaciones. Si bien las metodologías y los procedimientos utilizados para realizar cada uno de estos pasos pueden afectar la naturaleza de la recomendación final, parece que las amplias discrepancias en las recomendaciones de fertilizantes desarrolladas por diferentes laboratorios que operan en una región se deben, en la mayoría de los casos, a diferentes técnicas de interpretación (Quispe-Matos et al., 2025).

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

El índice de saturación de bases catiónicas (BCSR, por sus siglas en inglés) es un enfoque ampliamente estudiado en la ciencia del suelo para evaluar la fertilidad edáfica en función del equilibrio relativo de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo (Culman et al., 2021). Esta teoría, inicialmente propuesta por William Albrecht y posteriormente desarrollada en sistemas agronómicos modernos, postula que existen proporciones óptimas entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y, en algunos casos, sodio (Na^+), que maximizan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2024). También se han estudiado las variaciones entre las proporciones óptimas en función de la mineralogía del suelo y los requerimientos de los cultivos (Kopittke y Menzies, 2007). Sin embargo, estudios recientes han cuestionado la universalidad del BCSR, señalando que los sistemas basados en suficiencia de nutrientes (SLAN) pueden ser más relevantes en ciertos contextos edáficos (Brock et al., 2021). En este sentido, esta sección examina la aplicabilidad del BCSR en los suelos de la EEA Vista Florida del INIA.

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de índice de saturación de bases catiónicas (BCSR) tuvo su origen en las investigaciones de William Albrecht en la década de 1930, quien estudió la relación entre la proporción de cationes básicos intercambiables en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y la productividad de los cultivos (Culman et al., 2021). Albrecht, basado en estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, propuso que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) mejora la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de las plantas (Chaganti y Culman, 2017). Su hipótesis argumenta que una desviación de los valores óptimos de las proporciones catiónicas en la solución suelo, limita la absorción de nutrientes de los cultivos, debido a que un desequilibrio entre los iones en solución afecta los mecanismos que regulan la reactividad y disponibilidad de los nutrientes del suelo. Estos mecanismos reguladores del equilibrio iónico se ilustran en la Figura 1. Se considera que sólo una pequeña fracción de los nutrientes que requieren las plantas se encuentran en la solución suelo o en alguna forma reactiva. Además, este esquema sostiene que cada mecanismo es un reservorio iónico (Quispe-Matos et al., 2025).

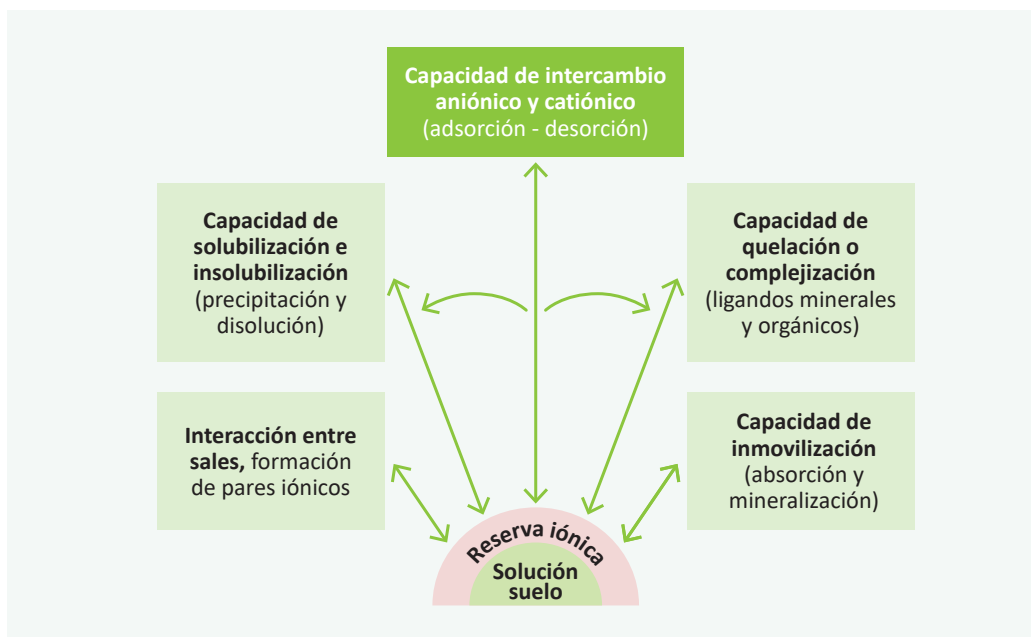


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Bear et al. (1945), con base en estudios en suelos agrícolas de Nueva Jersey, proporcionaron evidencia empírica que respaldó parcialmente la hipótesis de Albrecht. Según las investigaciones clásicas de Bear et al. (1945), y posteriormente sustentadas por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), la saturación óptima en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), debería distribuirse aproximadamente en 65-75 % de Ca^{2+} , 10-15 % de Mg^{2+} , 3-7 % de K^+ y menos del 5 % de Na^+ , mientras que el hidrógeno (H^+) y el aluminio (Al^{3+}) deberían mantener niveles suficientemente bajos, menores a 15 %, para evitar su toxicidad en suelos ácidos. A partir de estos hallazgos, se promovió el BCSR como un criterio para la formulación de programas de fertilización y enmiendas de suelos (Zhang, 1999).

En décadas recientes, diferentes investigaciones han comparado la efectividad del BCSR con el sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), evidenciando que en muchos casos la disponibilidad absoluta de nutrientes es un mejor predictor del rendimiento de los cultivos que la proporción relativa de cationes (Brock et al., 2021). Sin embargo, en suelos con alta CIC ($> 8 \text{ cmol kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, altos niveles de lixiviación o desbalances extremos de bases, el BCSR sigue siendo una herramienta útil para el diagnóstico de fertilidad y la corrección de desequilibrios iónicos (Quispe-Matos et al., 2025).

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

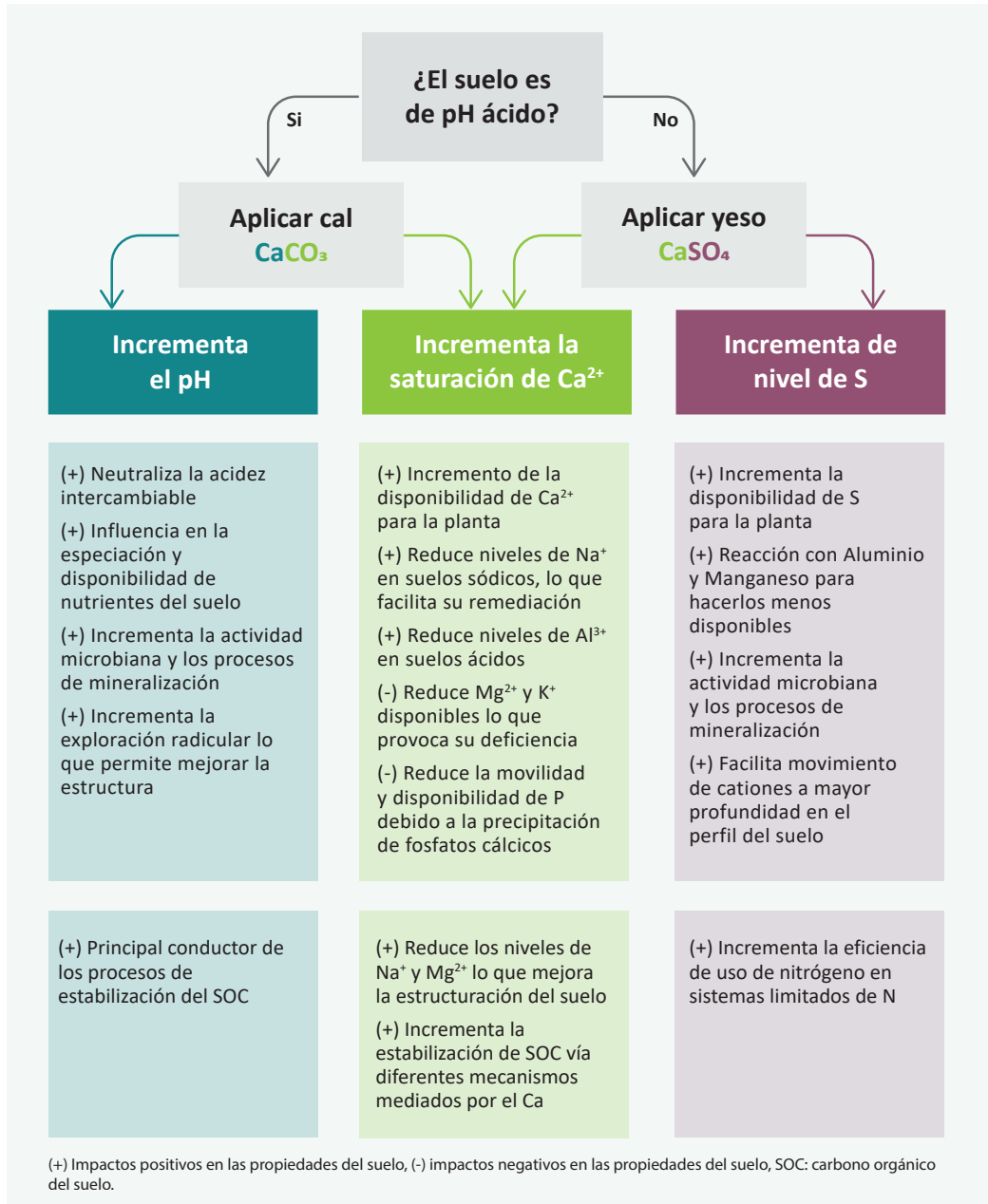


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

El concepto de sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN, por sus siglas en inglés) se basa en una expresión matemática general de la Ley de rendimientos decrecientes, según la cual el aumento del rendimiento de un cultivo por unidad de nutriente disponible disminuye a medida que el nivel de nutriente disponible se acerca al nivel de suficiencia o umbral crítico (McLean, 1977). Esta teoría, aunque presenta sustento científico, también ha sido criticada debido a que no contempla la interacción entre nutrientes y los problemas estructurales del suelo. Sin embargo, es una herramienta fundamental para la interpretación de análisis de suelos. Para su aplicación práctica, el diagnóstico de la fertilidad mediante el SLAN requiere de tres etapas: la correlación, calibración y la interpretación de los análisis de suelos, que se describen en la Figura 3 (Quispe-Matos et al., 2025).

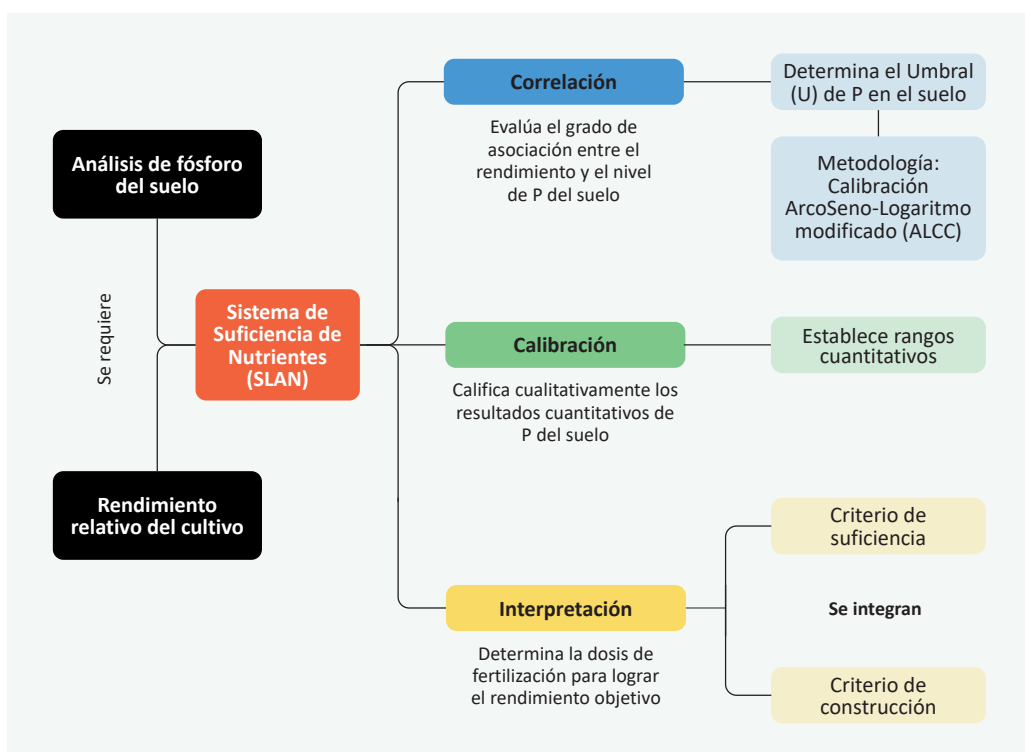


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

A continuación, se presenta un ejemplo práctico para determinar el requerimiento de fósforo (P) necesario para alcanzar un rendimiento objetivo en el cultivo de arroz, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de arroz, y se obtuvo 8 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 11 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 10 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 8 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 8 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (8 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (10 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 8 t ha⁻¹ en lugar de 10 t ha⁻¹.

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos, considerar que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.50 \times \text{Rendimiento alcanzado} \quad \dots(3)$$

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.50 \times 8 \text{ t ha}^{-1} = 4 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 8 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 4 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:

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

$$\text{Requerimiento de P} = 8 \text{ t ha}^{-1} + 4 \text{ t ha}^{-1} = 12 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2.5 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12 \text{ t ha}^{-1} = 30 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 30 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 12 t ha⁻¹, el cual está conformado por 4 t ha⁻¹ de raíces, tallos y hojas, y 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 a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutriente estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

Los criterios de mantenimiento y construcción integran conceptos modernos de mejora de la fertilidad del suelo a largo plazo. Este enfoque integrado busca incrementar progresivamente la concentración de nutrientes en el suelo mediante aplicaciones superiores a las necesidades del cultivo, hasta alcanzar un umbral óptimo determinado mediante estudios de calibración de respuesta agronómica (Marino y Echeverría, 2018). Esto es particularmente relevante en suelos con niveles medios y bajos de nutrientes disponibles o con alta capacidad de adsorción, donde la saturación gradual de los sitios de intercambio permite reducir la fijación de elementos esenciales como el fósforo (P) y el potasio (K), y así mejorar su disponibilidad en ciclos de producción posteriores (Barber, 1995; Havlin et al., 2016).

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos con el cultivo de arroz para la aplicación del criterio de mantenimiento, y criterios de mantenimiento y construcción.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de arroz, y se obtuvo 6 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 11 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 10 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 6 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 6 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 5 \text{ t ha}^{-1}$$

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 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.50 \times 5 \text{ t ha}^{-1} = 2.5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 5 \text{ t ha}^{-1} + 2.5 \text{ t ha}^{-1} = 7.5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2.5 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 7.5 \text{ t ha}^{-1} = 18.75 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: finalmente, determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P, con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 30 %.

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

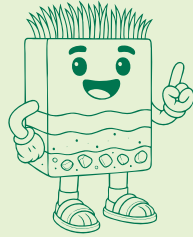
$$\text{RM de P} = \frac{18.75 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 62.50 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de arroz es 62.50 kg por hectárea.

Ejemplo práctico criterios de mantenimiento y construcción

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de arroz, y se obtuvo 4 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera muy bajo.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 11 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 10 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 4 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 4 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{30 \times 10 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 3 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 50 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.50 \times 3.0 \text{ t ha}^{-1} = 1.5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 3.0 \text{ t ha}^{-1} + 1.50 \text{ t ha}^{-1} = 4.50 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 2.5 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 4.50 \text{ t ha}^{-1} = 11.25 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{11.25 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 56.25 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 le 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.

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

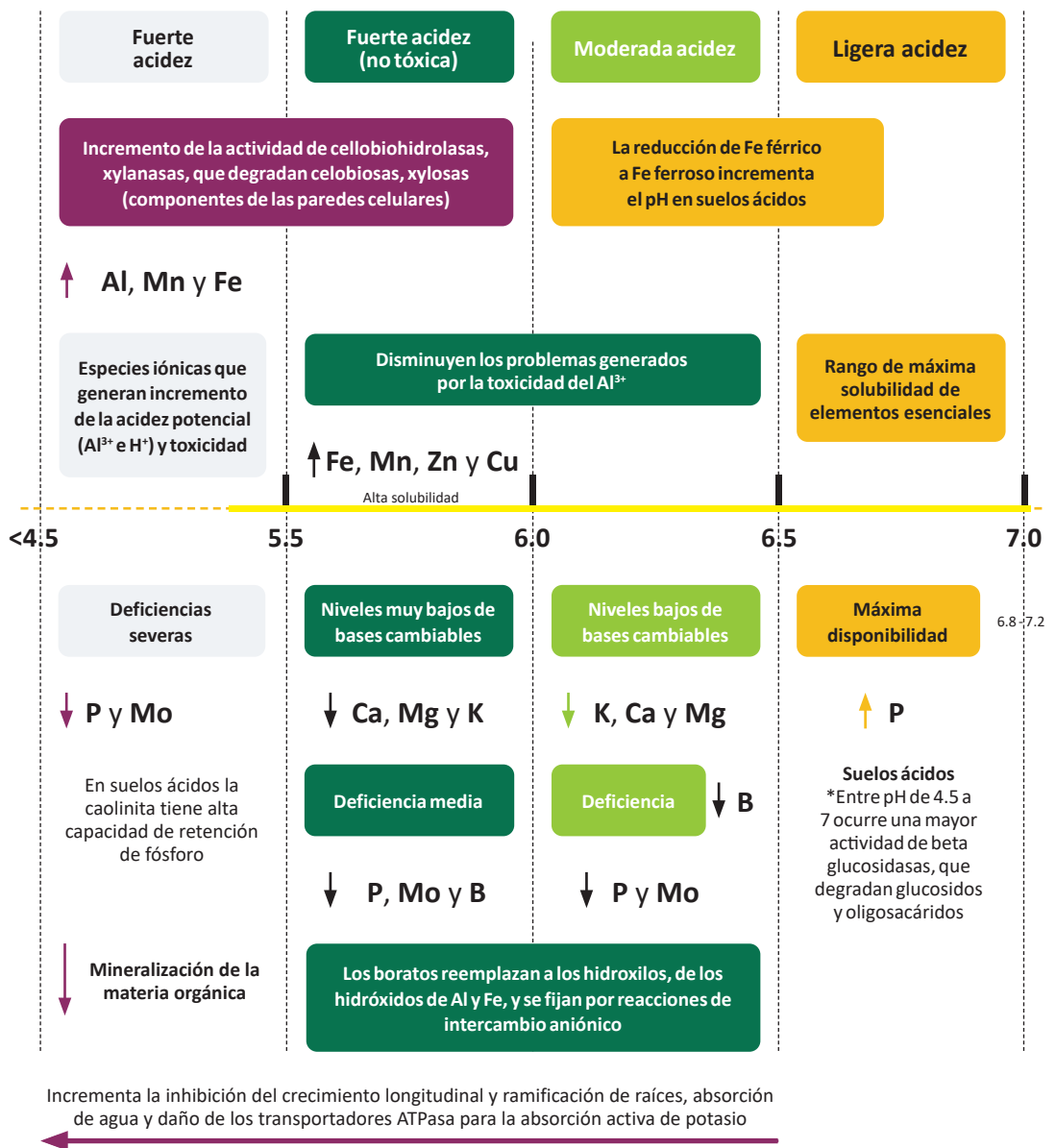
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 56.25 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 69.75 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de arroz es 69.75 kg por hectárea.

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

La medición del pH en suelos tiene su origen en la química ácido-base de Arrhenius y Bronsted-Lowry, y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa (Atkins et al., 2023). Sus aplicaciones en estudios de fertilidad inician en las primeras décadas del siglo XX, con estudios pioneros que demostraron la relación entre el pH del suelo y la solubilidad de los nutrientes esenciales (Pierre y Banwart, 1973). Actualmente, se considera que el pH del suelo controla las comunidades microbianas y la actividad enzimática de la solución suelo, además de modular los mecanismos de estabilización de carbono del suelo (Wang y Kuzyakov, 2024).

Por estos motivos, es considerada una variable maestra dentro del análisis, debido a que afecta una amplia gama de propiedades y procesos del suelo. En la Figura 4 se presenta un modelo gráfico de diagnóstico de la fertilidad del suelo en condiciones de pH ácidos según Hartemink y Barrow (2023), Wang y Kuzyakov (2024), Alam et al. (1999).



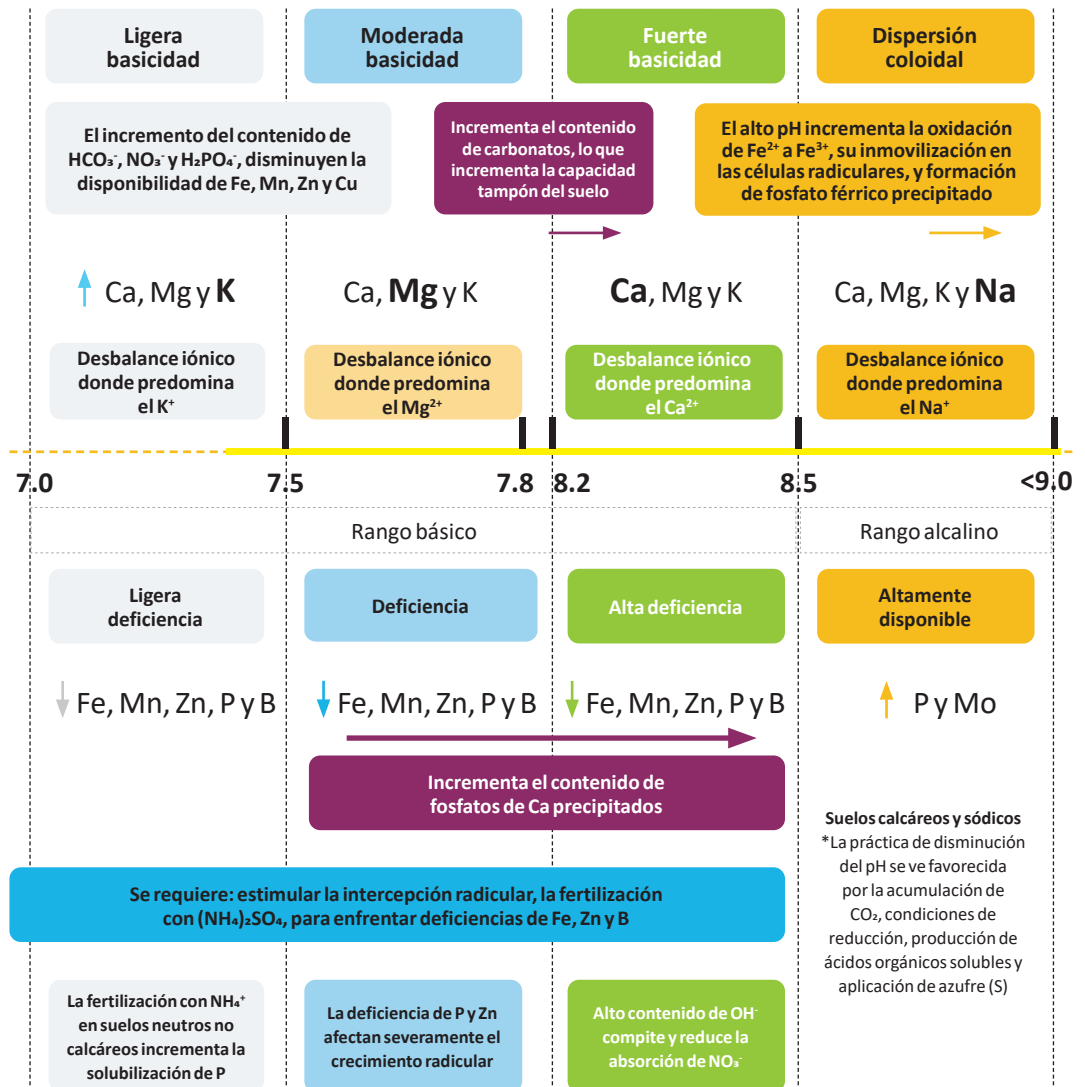


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 como una alternativa a la clasificación taxonómica de suelos (Garbanzo-León et al., 2017). El análisis geoestadístico de las propiedades del suelo es una herramienta útil para evaluar y predecir la variabilidad espacial de las propiedades como pH, textura, densidad aparente y nutrientes (Niebla-Torres et al., 2021). Mediante técnicas de interpolación, como el método *kriging* con ajuste de modelos de semivariograma de tipo empírico (lineal, esférico, circular y gaussiano), se pueden crear mapas que reflejan la distribución espacial de estas propiedades, lo que es crucial para la agricultura, el manejo sostenible del suelo y la aplicación de fertilizantes (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

La aplicación de modelos geoestadísticos, combinados con sistemas de información geográfica (SIG), permite predecir las propiedades del suelo en áreas no muestreadas, lo que es especialmente útil en regiones con datos limitados (Moral-García, 2004). Además, la geoestadística ayuda a comprender las interrelaciones entre variables químicas y físicas del suelo, como la influencia del tamaño de partículas y la porosidad en la variabilidad espacial (Álvarez-Herrera et al., 2021). Esto contribuye significativamente a la optimización de prácticas agrícolas y al mantenimiento de la salud del suelo a largo plazo.



Pro Suelos y Aguas
LABSAF

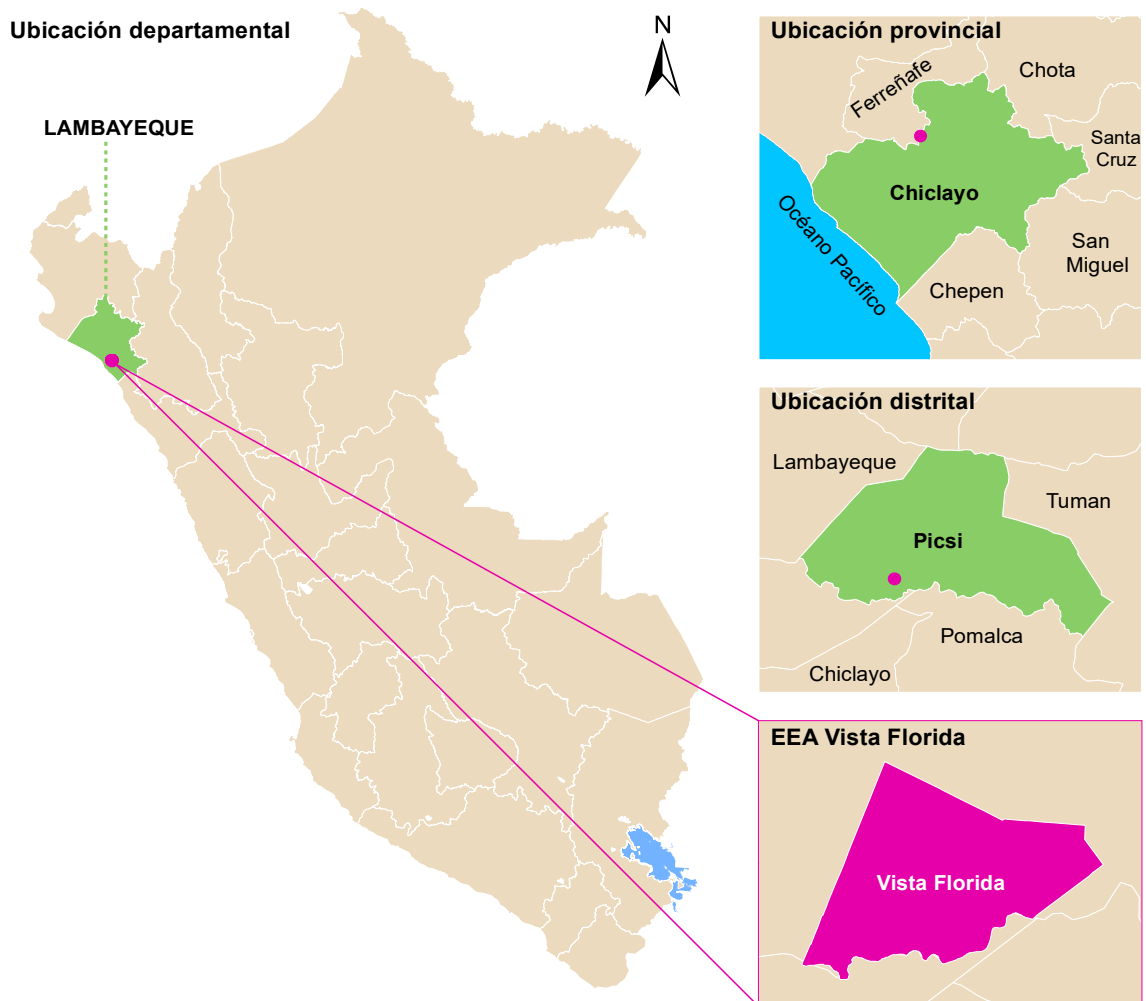
Ac. Nítrico

3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Vista Florida

3.1. Ubicación de la EEA Vista Florida

La EEA Vista Florida presenta suelos de tipo Leptosol éútrico-Regosol éútrico. El material litológico que ha dado origen a estos suelos es variable, tales como cuarcitas, areniscas, calizas, lutitas y rocas volcánicas (INRENA, 1996). Además, cuenta con un centro experimental, con una extensión total de 335.80 ha, siendo los cultivos priorizados como el arroz (*Oriza sativa* L.), maíz amarillo duro (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y algodón (*Gossypium barbadense* L.).

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Lambayeque. La EEA Vista Florida se encuentra en el distrito de Picsi, en la provincia de Chiclayo, en el departamento de Lambayeque (Figura 5), en la región Costa o Chala a 40 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 30 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 18 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025).



3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

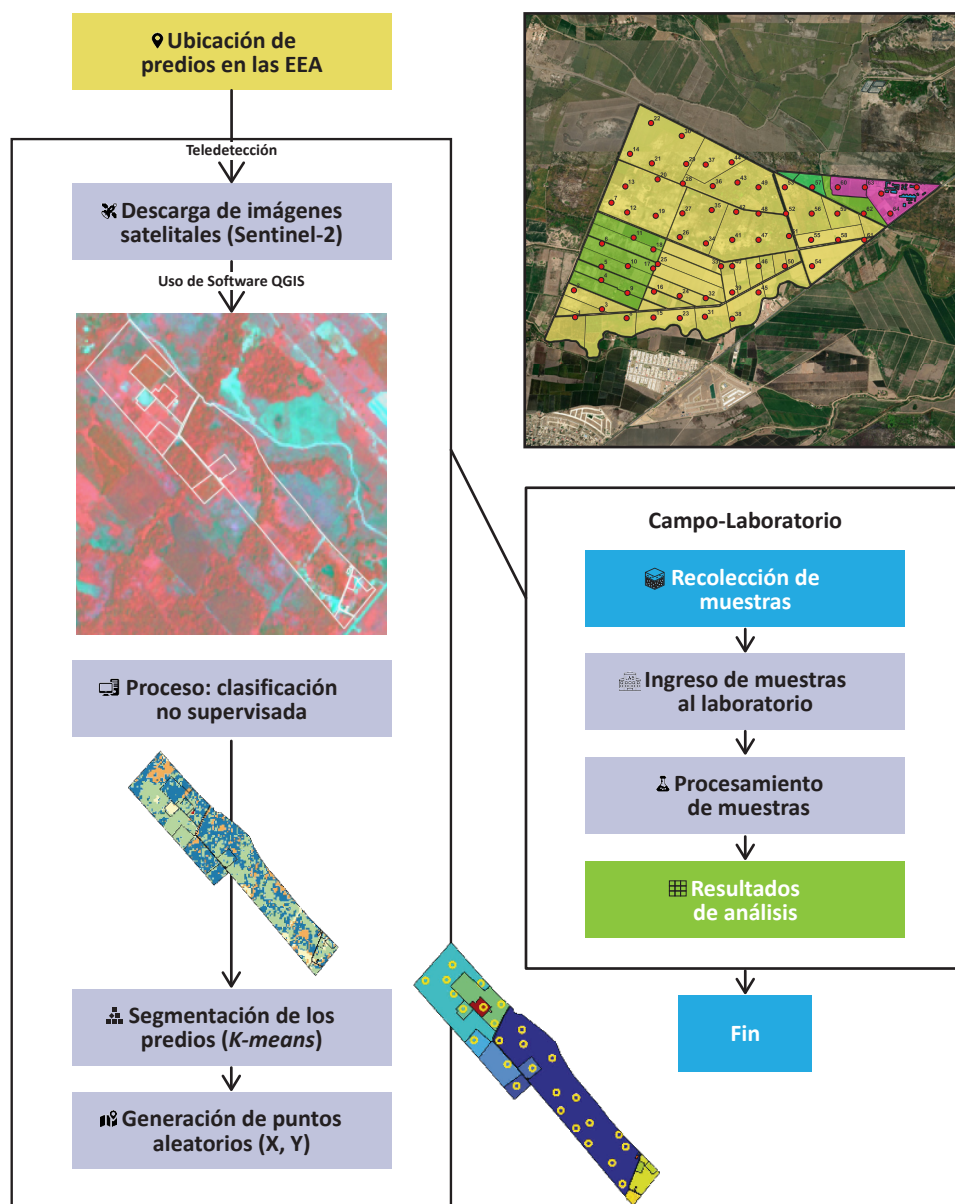


Figura 6. Flujo de trabajo para determinar los puntos de muestreo

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

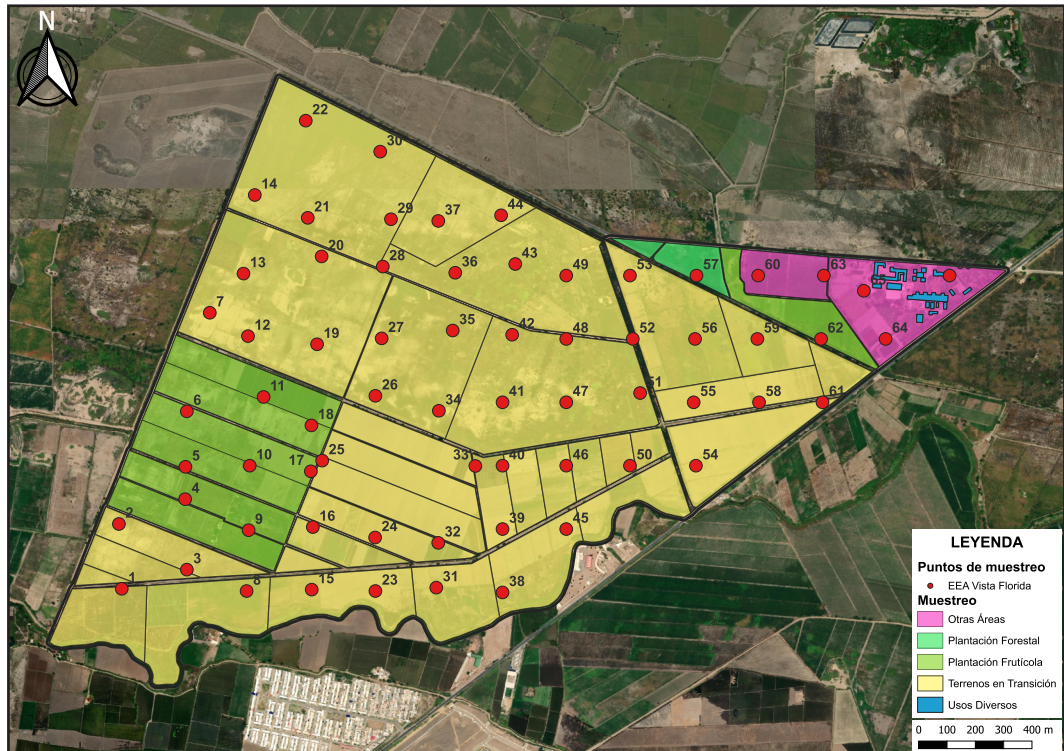


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Vista Florida

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 66 puntos de muestreo, los pasos que se siguieron para la colecta de muestras fueron los siguientes (Figura 8):

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



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

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis, 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, por 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

Los resultados de la Tabla 2, correspondiente a la EEA Vista Florida, muestran que los suelos presentan, en promedio, una textura franca equilibrada (34.90 % arena, 31.12 % arcilla y 33.97 % limo), con una variabilidad baja a moderada (CV entre 18-34 %) y distribución cercana a la simetría (asimetría entre -0.24 y 0.19). Esto indica una composición granulométrica relativamente homogénea, lo que favorece un balance en las propiedades de retención de agua y aireación del suelo.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en la Vista Florida

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Skewness	Mínimo	Mediana	Máximo
pH	unidad	7.55	0.26	3.42	-0.20	7.00	7.55	8.00
CE	dS m ⁻¹	6.00	7.51	125.08	2.46	0.82	2.78	37.60
MO	%	1.48	0.59	39.66	1.27	0.50	1.40	3.80
P disp.	mg kg ⁻¹	26.89	14.46	53.79	4.14	14.00	23.25	118.60
K disp.	mg kg ⁻¹	396.12	267.36	67.49	3.41	171.70	304.05	1901.60
N-MO	mg kg ⁻¹	768.18	289.91	37.74	1.29	300.00	700.00	1900.00
Arena	%	34.90	11.72	33.57	-0.24	9.80	36.80	56.30
Arcilla	%	31.12	8.69	27.93	0.19	11.00	32.30	53.70
Limo	%	33.97	6.20	18.26	-0.13	20.10	34.20	46.20
CaCO ₃	%	6.23	1.21	19.38	0.40	3.60	6.15	9.30
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	47.82	5.18	10.83	0.09	38.90	47.55	61.30
K ⁺	cmol kg ⁻¹	1.25	0.84	67.09	3.21	0.50	1.00	5.90
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	3.84	1.21	31.50	2.79	1.80	3.70	10.50
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	2.72	3.70	135.80	2.82	0.20	1.60	20.60

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: coeficiente de asimetría, CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, N-MO: nitrógeno estimado de la materia orgánica.

El pH del suelo es ligeramente alcalino (7.55 ± 0.26 , CV = 3.42 %), con distribución aproximadamente simétrica (asimetría = -0.20). Esta condición alcalina, junto con la presencia de carbonatos de calcio ($6.23 \% \pm 1.21 \%$), sugiere un entorno con alto poder amortiguador, que podría limitar la disponibilidad de ciertos micronutrientes como hierro, zinc y manganeso.

La conductividad eléctrica (CE = $6.00 \text{ dS m}^{-1} \pm 7.51$) presenta una muy alta variabilidad (CV = 125.08 %) y valores extremos de hasta 37.60 dS m^{-1} , lo cual evidencia la existencia de sectores con problemas de salinidad que pueden afectar el crecimiento vegetal, a pesar de que la mediana (2.78 dS m^{-1}) indica que una parte de los suelos no presenta salinidad severa.

El contenido de materia orgánica ($1.48 \% \pm 0.59$, CV = 39.66 %) y de nitrógeno total ($768.18 \text{ mg kg}^{-1} \pm 289.91$, CV = 37.74 %) es bajo, aunque con cierta heterogeneidad. Esto refleja una condición de fertilidad orgánica limitada, posiblemente asociada a condiciones climáticas y al uso agrícola intensivo, lo que demanda prácticas que incrementen el aporte de residuos y abonos orgánicos.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de fósforo disponible ($26.89 \text{ mg kg}^{-1} \pm 14.46$) muestran una alta variabilidad (CV = 53.79 %) y una fuerte asimetría positiva (*Skewness* = 4.14), con valores extremos superiores a 100 mg kg^{-1} , lo que sugiere la existencia de *hotspots* generados por aplicaciones localizadas de fertilizantes. El potasio disponible es elevado en promedio ($396.12 \text{ mg kg}^{-1} \pm 267.36$), también con gran variabilidad (CV = 67.49 %), alcanzando valores máximos de hasta $1901.60 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que confirma la presencia de sectores con acumulación puntual.

Respecto al complejo de intercambio catiónico, los suelos presentan altos contenidos de calcio ($47.82 \text{ cmol kg}^{-1}$), lo cual coincide con la abundancia de carbonatos y explica la condición alcalina del suelo. El magnesio ($3.84 \text{ cmol kg}^{-1}$) y el potasio intercambiable ($1.25 \text{ cmol kg}^{-1}$) son adecuados, aunque con fuerte dispersión, mientras que el sodio ($2.72 \text{ cmol kg}^{-1}$, CV = 135.80 %) alcanza valores extremos de hasta $20.60 \text{ cmol kg}^{-1}$, indicando que existen sectores con riesgo de sodicidad que podrían afectar la estructura del suelo y la infiltración de agua.

En conjunto, los suelos de la EEA Vista Florida se caracterizan por una textura balanceada, un pH alcalino con presencia de carbonatos, y una fertilidad química contrastante, con deficiencia de materia orgánica y nitrógeno, pero altos niveles de calcio y variabilidad en fósforo, potasio y sodio. Estas condiciones sugieren la necesidad de un manejo diferenciado por ambientes, que incluya la incorporación de materia orgánica, prácticas de lavado o manejo de sales en zonas salinas y una estrategia de fertilización más balanceada y homogénea.

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 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). Verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de los datos:** realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y evaluar la dispersión mediante la desviación estándar. Asimismo, emplear diagramas de caja para identificar patrones y detectar posibles valores atípicos.
- c. **Carga en QGIS:** importar los datos georreferenciados como una capa vectorial en QGIS y confirmar que la proyección de la capa sea coherente con la zona de estudio.

3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran

Procedimiento:

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

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

Donde:

$I > 0$: existe autocorrelación espacial positiva (valores similares tienden a estar juntos).

$I < 0$: existe autocorrelación espacial negativa (valores diferentes tienden a estar juntos).

$I = 0$: ausencia de autocorrelación (se da una distribución aleatoria).

Si el p-valor es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que hay evidencia de un patrón espacial significativo. Si el p-valor es mayor a 0.05, no se puede rechazar la H_0 , lo que sugiere que los datos no tienen autocorrelación espacial significativa.

Según el cálculo de estas medidas estadísticas, se procederá o no al cálculo del variograma experimental, ajuste de un modelo a dicho variograma, la interpolación *kriging* y su validación cruzada.

3.7. Interpolación *kriging* y validación cruzada con indicadores geoestadísticos

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

- a. Calcular el variograma experimental utilizando el complemento **Smart-Map**.
- b. Ajustar un modelo teórico (esférico, exponencial o gaussiano) al variograma.
- c. Ajustar los parámetros del modelo:
 - **Sill** (umbral): varianza de las diferencias máximas entre los puntos.
 - **Range** (alcance): distancia a partir de la cual no hay autocorrelación significativa.
 - **Nugget** (pepita): variabilidad no explicada (ruido o error de medición).
- d. Calcular la proporción **Sill-Nugget** (PSV).

3.7.2. Interpolación *kriging*

- a. Configurar los parámetros de interpolación en **Smart-Map**.
- b. Seleccionar la variable y el modelo ajustado.
- c. Seleccionar el método de interpolación: *kriging* ordinario.
- d. Generar el mapa rasterizado.
- e. Exportar el mapa en formato **GeoTIFF** para su almacenamiento y análisis posterior.

3.7.3. Validación cruzada

Para realizar una validación cruzada de los resultados, se deberá hacer lo siguiente: en **Smart-Map** se debe activar la opción de validación cruzada o *cross validation*. El complemento evalúa el error mediante los siguientes métodos:

- a. **Error cuadrático medio (RMSE)**: Mide la precisión del modelo, donde un valor alto puede significar que el modelo no representa adecuadamente la variabilidad espacial o que los datos contienen errores o son insuficientes (fórmula 10).

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

La caracterización geoestadística de los suelos de la EEA Vista Florida permitió identificar patrones espaciales definidos en varias propiedades edáficas, con especial relevancia en aquellas vinculadas al complejo de intercambio catiónico y a la fertilidad química (Tabla 3). Variables como el Ca^{2+} intercambiable ($R^2 = 0.97$), pH ($R^2 = 0.89$), K disponible ($R^2 = 0.81$) y arena ($R^2 = 0.89$) mostraron una dependencia espacial fuerte, mayoritariamente modelada mediante funciones gaussianas, esféricas o lineales hasta el umbral. Esto evidencia una alta predictibilidad espacial, lo que constituye una base sólida para diseñar estrategias de manejo y fertilización sitio-específicas.

Las propiedades texturales presentaron comportamientos contrastantes: mientras la arena ($R^2 = 0.89$) y el limo ($R^2 = 0.80$) exhibieron estructuras espaciales consistentes, la arcilla ($R^2 = 0.62$) mostró dependencia espacial moderada. Estos resultados facilitan la delimitación de unidades edáficas con comportamiento físico diferenciado, útiles para planificar labores de riego y manejo de cultivos.

En relación con los nutrientes, el fósforo disponible ($R^2 = 0.73$) presentó dependencia espacial moderada a alta, lo que permite cartografiar su distribución con un nivel de precisión aceptable. En contraste, la materia orgánica ($R^2 = 0.02$) y el nitrógeno total ($R^2 = 0.19$) evidenciaron muy baja organización espacial, reflejando una marcada heterogeneidad y alta variabilidad local que dificultan la predicción mediante modelos geoestadísticos.

Entre las sales y cationes secundarios, el sodio ($R^2 = 0.40$) presentó dependencia espacial moderada, sugiriendo la existencia de zonas específicas con acumulación de este elemento, lo cual debe ser considerado para evitar riesgos de sodicidad. El magnesio intercambiable ($R^2 = 0.16$), en cambio, mostró un patrón prácticamente aleatorio, con escasa utilidad para la delimitación espacial. La conductividad eléctrica ($R^2 = 0.37$) reveló un ajuste bajo, indicando una distribución muy heterogénea de las sales solubles en el área de estudio.

En conjunto, los resultados indican que los suelos de Vista Florida presentan una estructura espacial bien definida en variables clave como el pH, la textura, el Ca^{2+} y el K disponible, mientras que otros parámetros, como la MO y el N, muestran un carácter fuertemente errático. Estas condiciones validan la aplicación de herramientas geoestadísticas para la zonificación edáfica diferenciada, especialmente en el manejo de nutrientes y cationes principales, aunque se requieren estrategias complementarias para el control de la salinidad y el incremento de la materia orgánica.

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

Variable	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Gaussian</i>	32.59	154.85	744.42	996.10	0.89
Limo	<i>Linear</i>	22.78	37.88	1092.13	96.59	0.80
Arcilla	<i>Linear to Sill</i>	23.30	72.45	575.68	517.94	0.62
pH	<i>Linear to Sill</i>	0.03	0.08	1165.23	0.00	0.89
CE	<i>Linear to Sill</i>	2268.53	3482.69	530.11	767 785.58	0.37
MO	<i>Gaussian</i>	0.00	0.22	215.37	0.00	0.02
N-MO	<i>Spherical</i>	0.02	0.04	401.56	0.00	0.19
P disp.	<i>Linear to Sill</i>	56.95	92.87	1760.79	317.62	0.73
K disp.	<i>Linear</i>	0.11	0.27	1204.09	0.01	0.81
Ca ²⁺	<i>Spherical</i>	7.27	31.25	1766.55	11.29	0.97
Mg ²⁺	<i>Linear to Sill</i>	0.69	0.61	1318.14	0.03	0.16
Na ⁺	<i>Linear to Sill</i>	2.28	4.80	660.51	4.21	0.40

CE: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, N-MO: nitrógeno estimado de la materia orgánica, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, RMSE: error cuadrático medio R²: coeficiente de determinación.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figuras 9-20). El rasgo más destacado es la presencia de un patrón calcáreo-alcálido (pH elevado y altos contenidos de Ca^{2+} y CaCO_3) con amplia continuidad espacial. Esta condición actúa como un fuerte amortiguador del pH, pero al mismo tiempo favorece la inmovilización de micronutrientes como Fe, Zn y Mn, lo que se traduce en deficiencias funcionales aun cuando las reservas totales son adecuadas. De forma complementaria, los mapas de conductividad eléctrica (CE) y del Na⁺ intercambiable muestran la existencia de parches salinos y zonas con sodicidad localizada, donde los valores elevados de CE y/o Na⁺ comprometen la germinación, la fisiología de las plantas y la estabilidad estructural del suelo. La cartografía de P y K revela, por su parte, la presencia de *hotspots* de acumulación, resultado de aplicaciones localizadas de fertilizantes que han generado una fuerte heterogeneidad en la fertilidad disponible.

En contraste, la representación espacial de la materia orgánica (MO) y del nitrógeno (N-MO) es débil y errática, con fluctuaciones locales que carecen de una estructura espacial clara. Esto implica que las reservas de MO y N-MO son poco predecibles a escala de campo y que las intervenciones deben planearse ya sea con muestreos más densos o con estrategias de manejo generalizadas. Por otro lado, las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) muestran una organización más consistente en el espacio, lo que permite delimitar unidades físicas relativamente homogéneas que condicionan la retención de agua, drenaje y respuesta a enmiendas. En conjunto, los mapas combinan variables con alta confiabilidad espacial (pH, Ca^{2+} , CaCO_3 , textura, P y K), idóneas para la zonificación directa, con otras de baja predictibilidad (MO, N-MO y, en parte, CE) que requieren validación local antes de aplicar intervenciones de mayor costo.

Desde el punto de vista agronómico, las implicancias del mapeo son claras. En las zonas calcáreo-alcálicas se debe priorizar la corrección de deficiencias de micronutrientes mediante aplicaciones foliares o fertilizantes quelatados, evitando modificar de forma drástica el pH. Los *hotspots* salinos requieren un diagnóstico en el agua de riego o acumulación superficial para determinar el origen de la salinidad. Así mismo, cuando sea viable, se debe manejar el drenaje y realizar lavados con agua de baja salinidad. Los sectores con sodicidad puntual demandan intervenciones específicas, como la aplicación de yeso agrícola y mejoras en el drenaje, para recuperar la estructura y la infiltración. En las áreas con acumulaciones localizadas de P y K es recomendable implementar estrategias de fertilización variable, reduciendo costos y evitando excesos. Finalmente, la baja y heterogénea MO del suelo hace necesario establecer programas de incremento del carbono a escala predial (con compost, abonos verdes y rotaciones de cultivo), en complemento a un muestreo intensificado en las áreas de mayor incertidumbre.

En síntesis, los mapas de la EEA Vista Florida constituyen una herramienta clave para la definición de unidades de manejo. La delimitación de estas unidades debe apoyarse en las variables con mayor confiabilidad espacial. Por otro lado, aquellas variables de baja predictibilidad deben acompañarse de un muestreo intensivo o el uso de covariables proximales. Este enfoque permite orientar la aplicación de enmiendas, el manejo de sales, la fertilización sitio-específica y las prácticas de conservación de la MO con una mejor relación costo-beneficio y un menor impacto ambiental, asegurando que las decisiones de manejo estén respaldadas por la dinámica real del suelo.

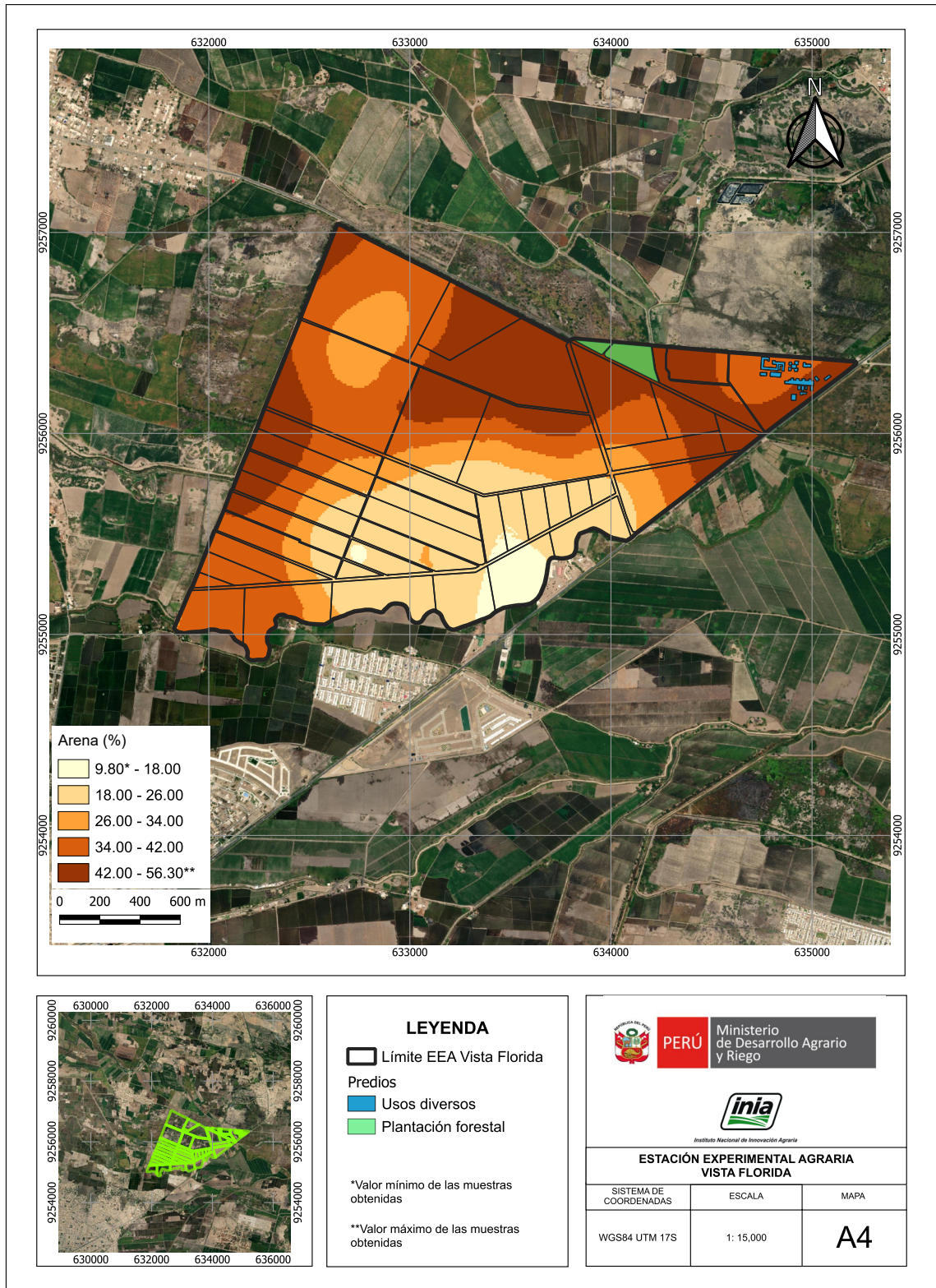


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

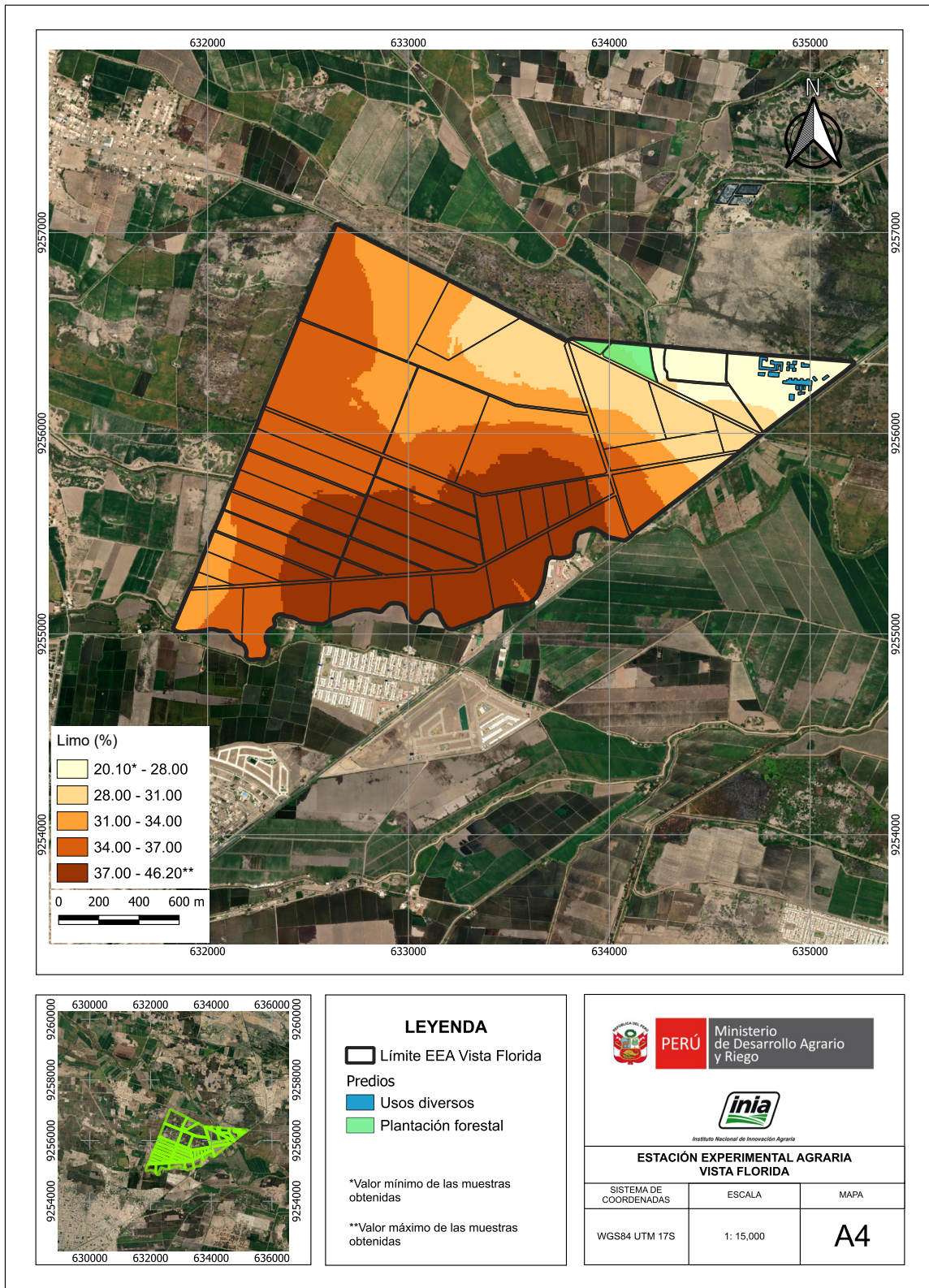


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

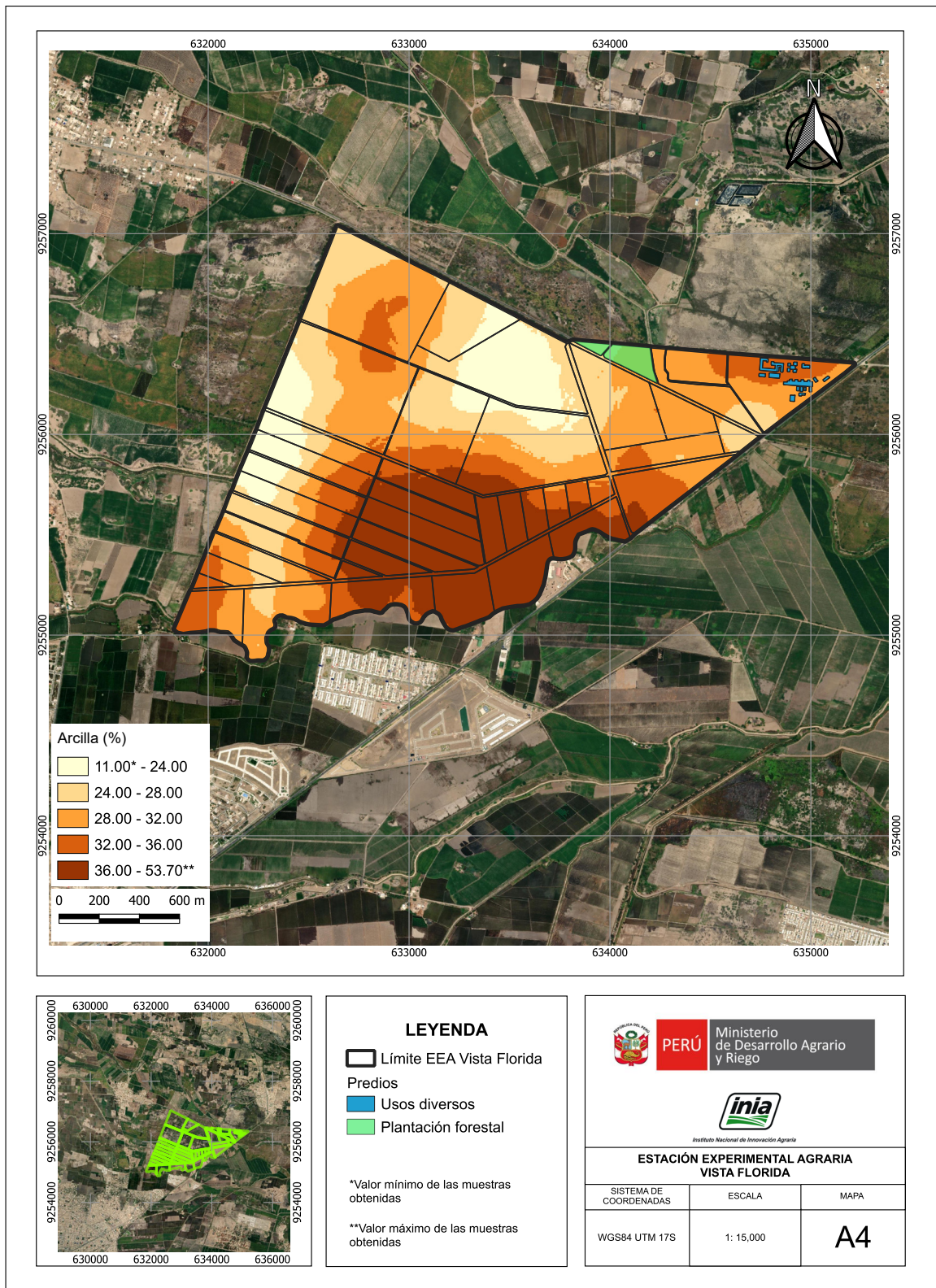


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

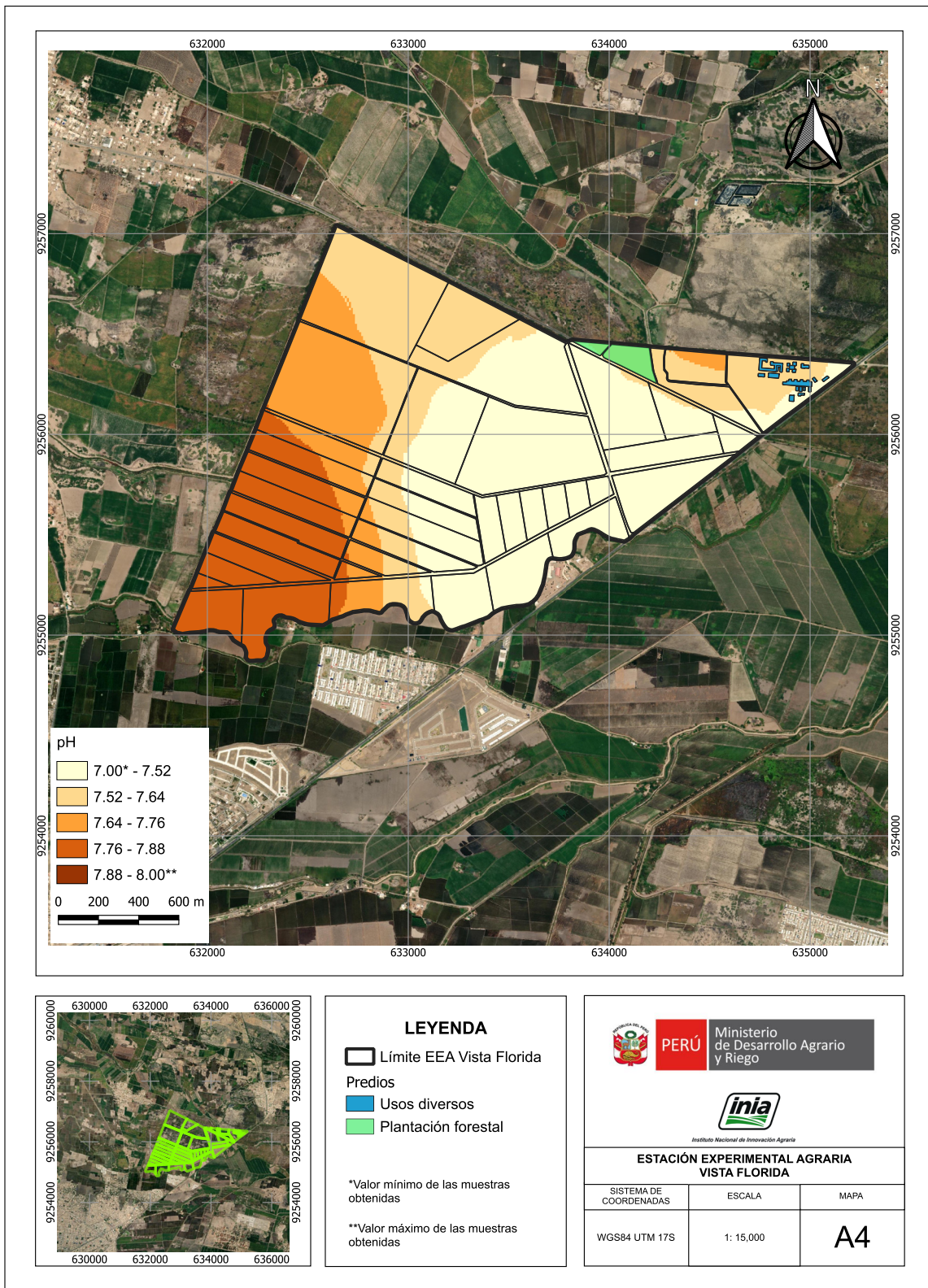


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

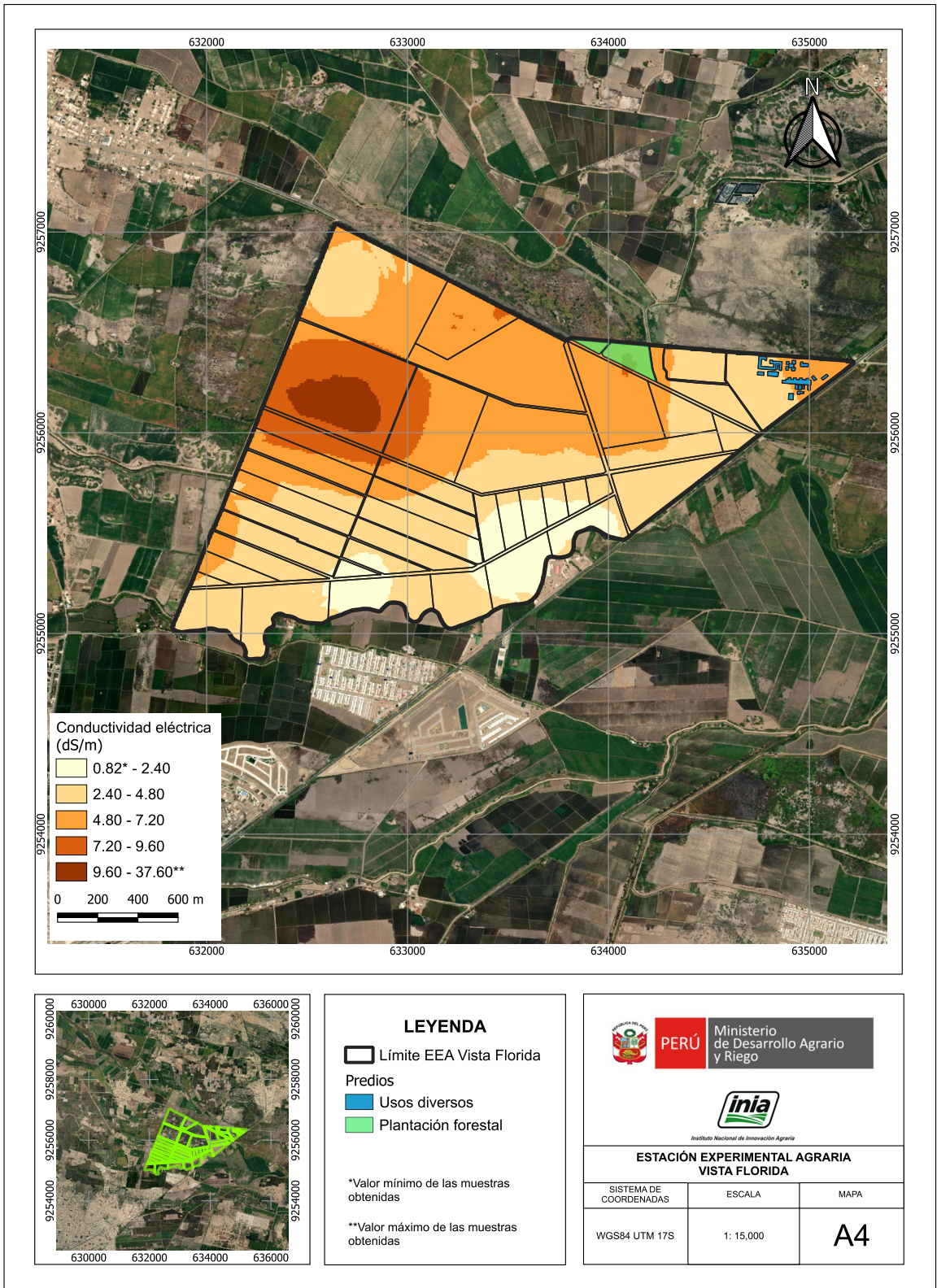


Figura 13. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica (CE)

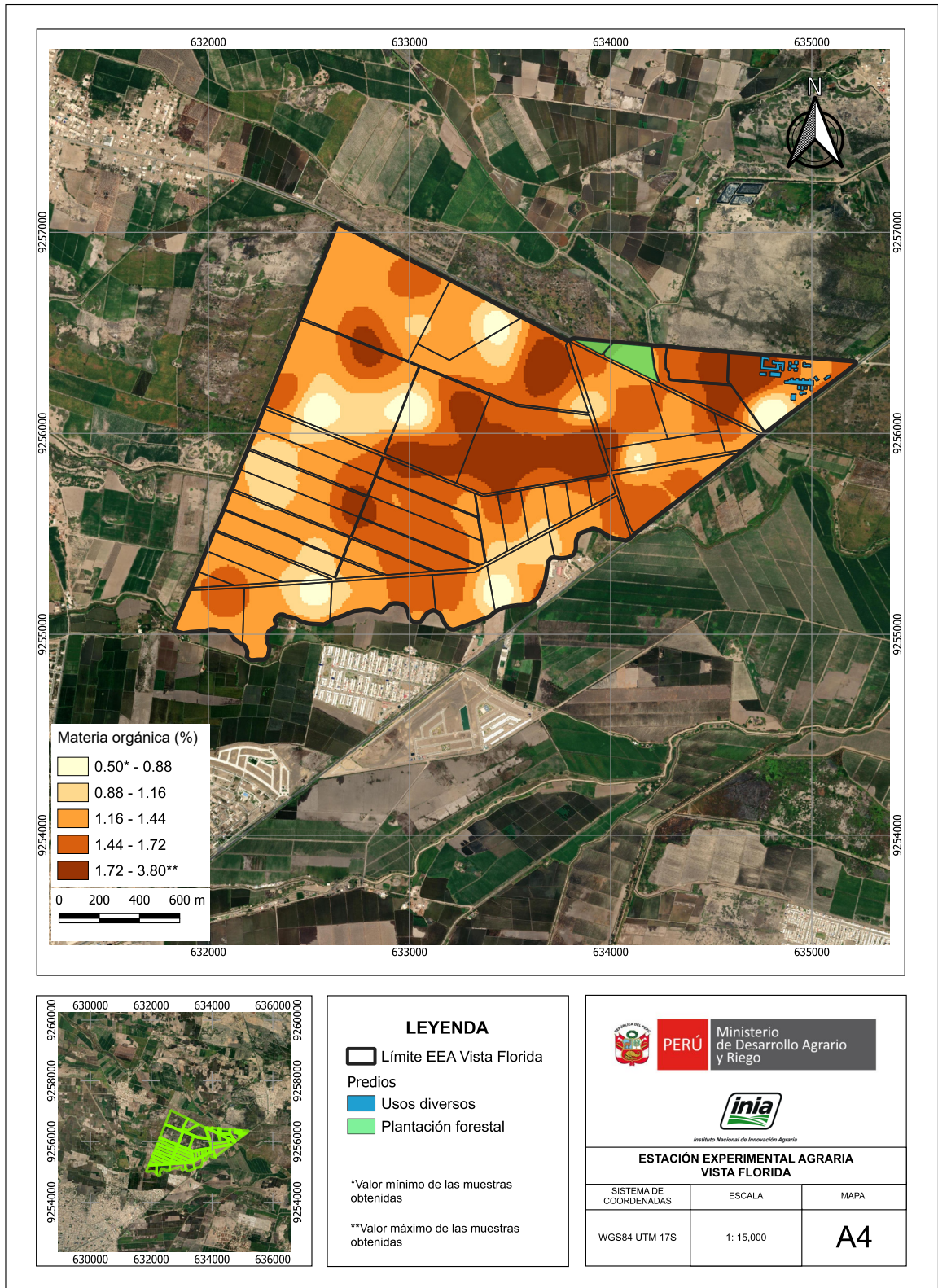


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica (MO)

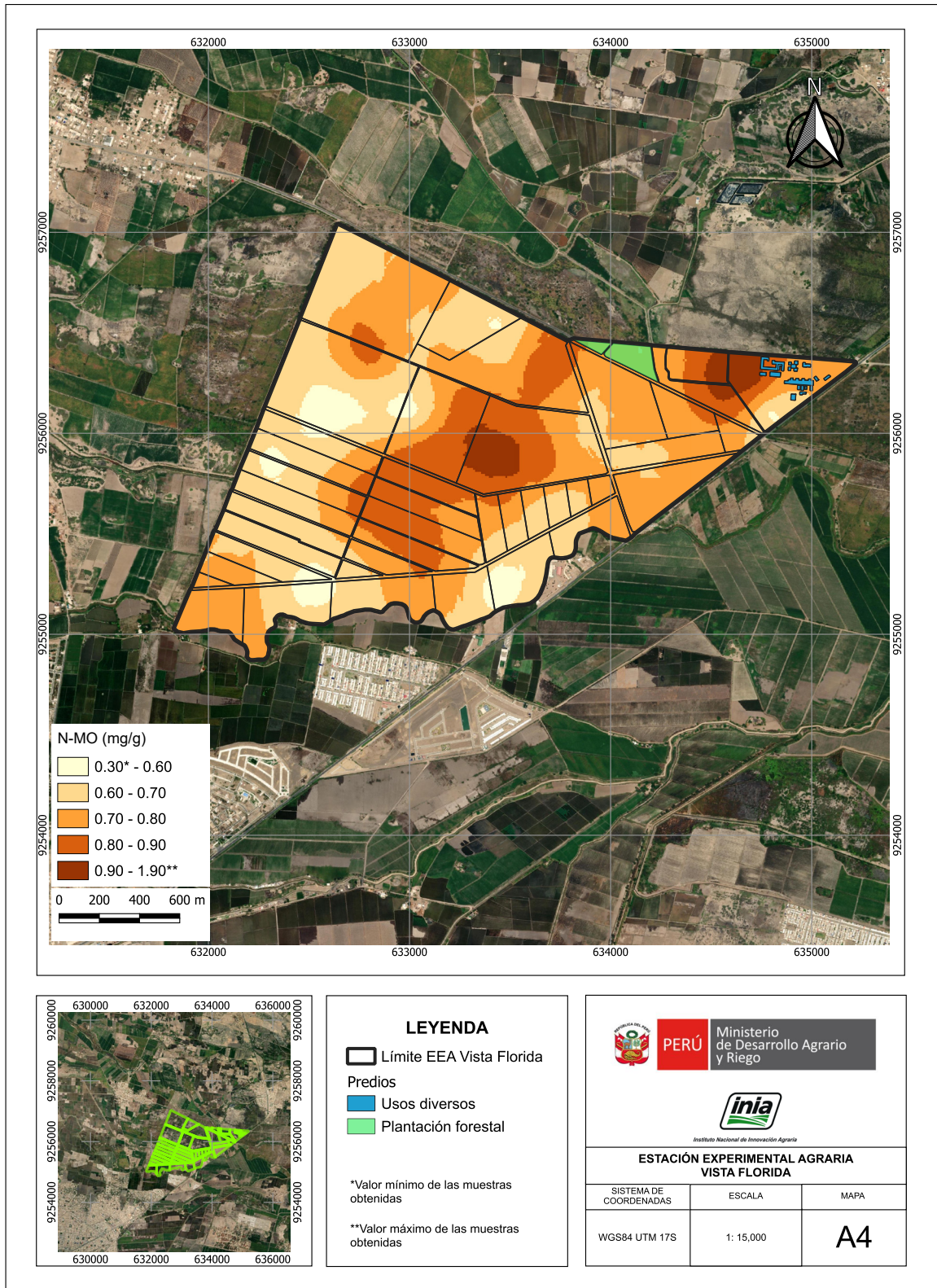


Figura 15. Mapa de variación espacial del nitrógeno de la materia orgánica (N-MO)

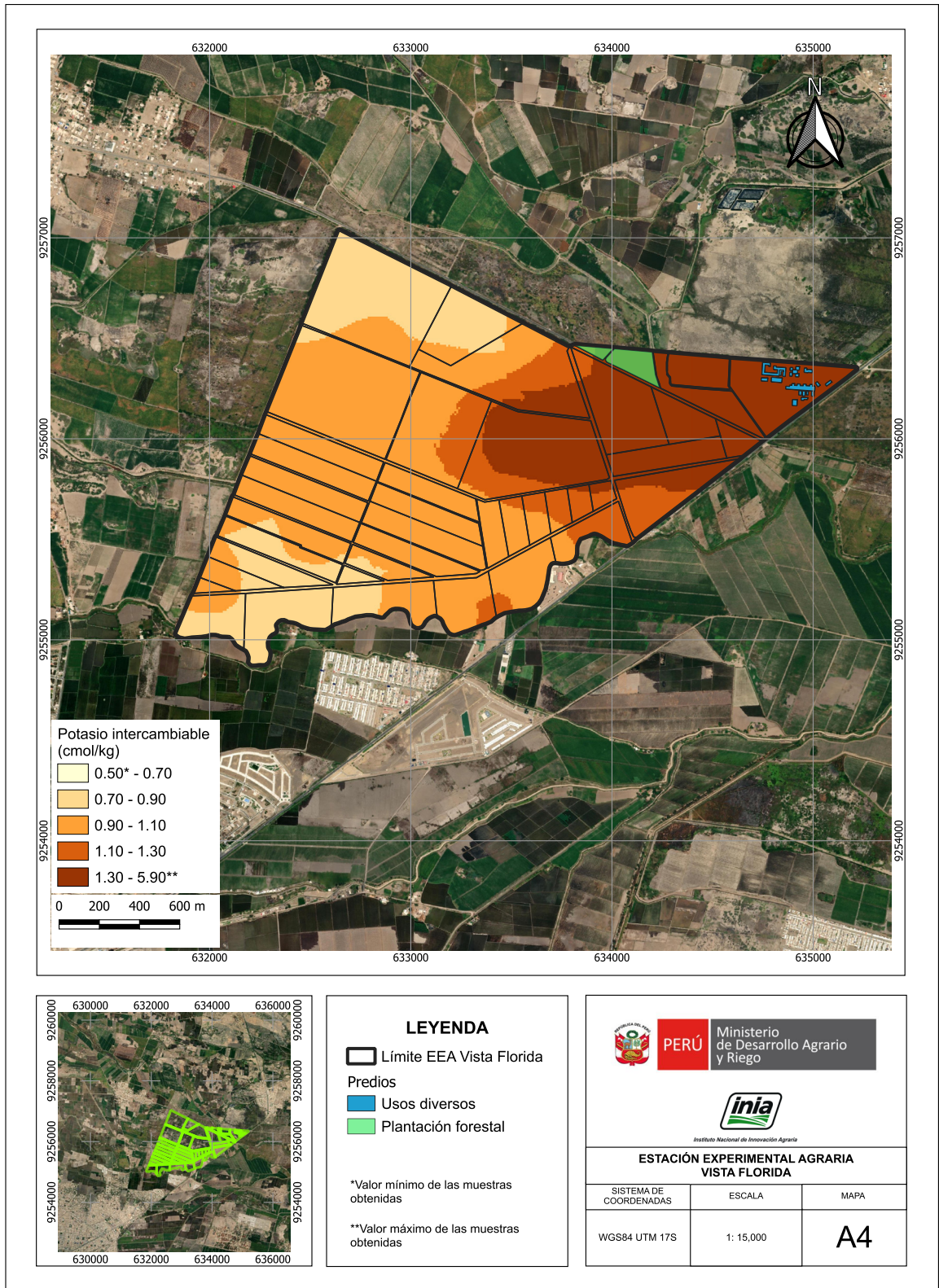


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio (K^+) intercambiable

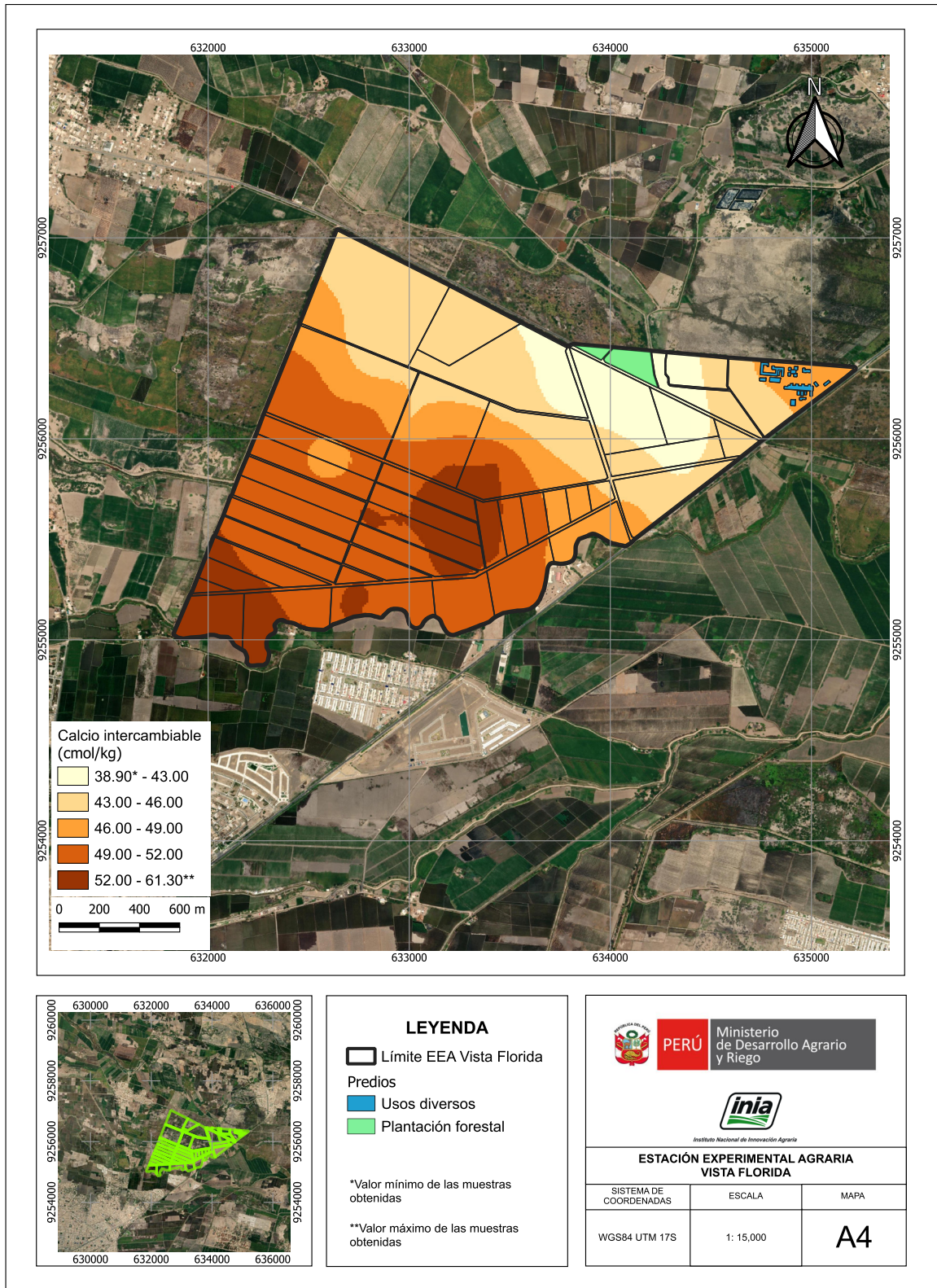


Figura 17. Mapa de variación espacial del calcio (Ca^{2+}) intercambiable

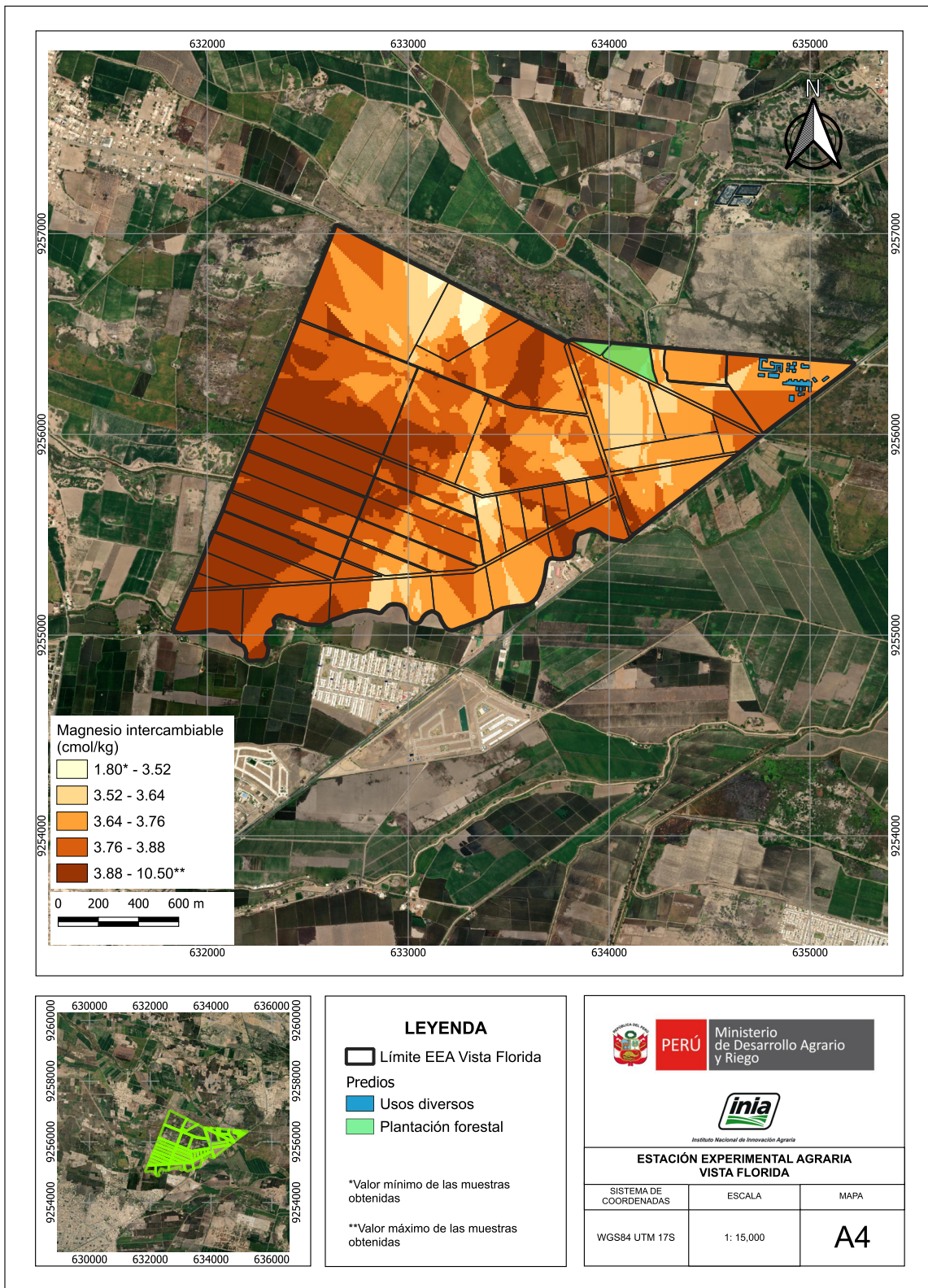


Figura 18. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

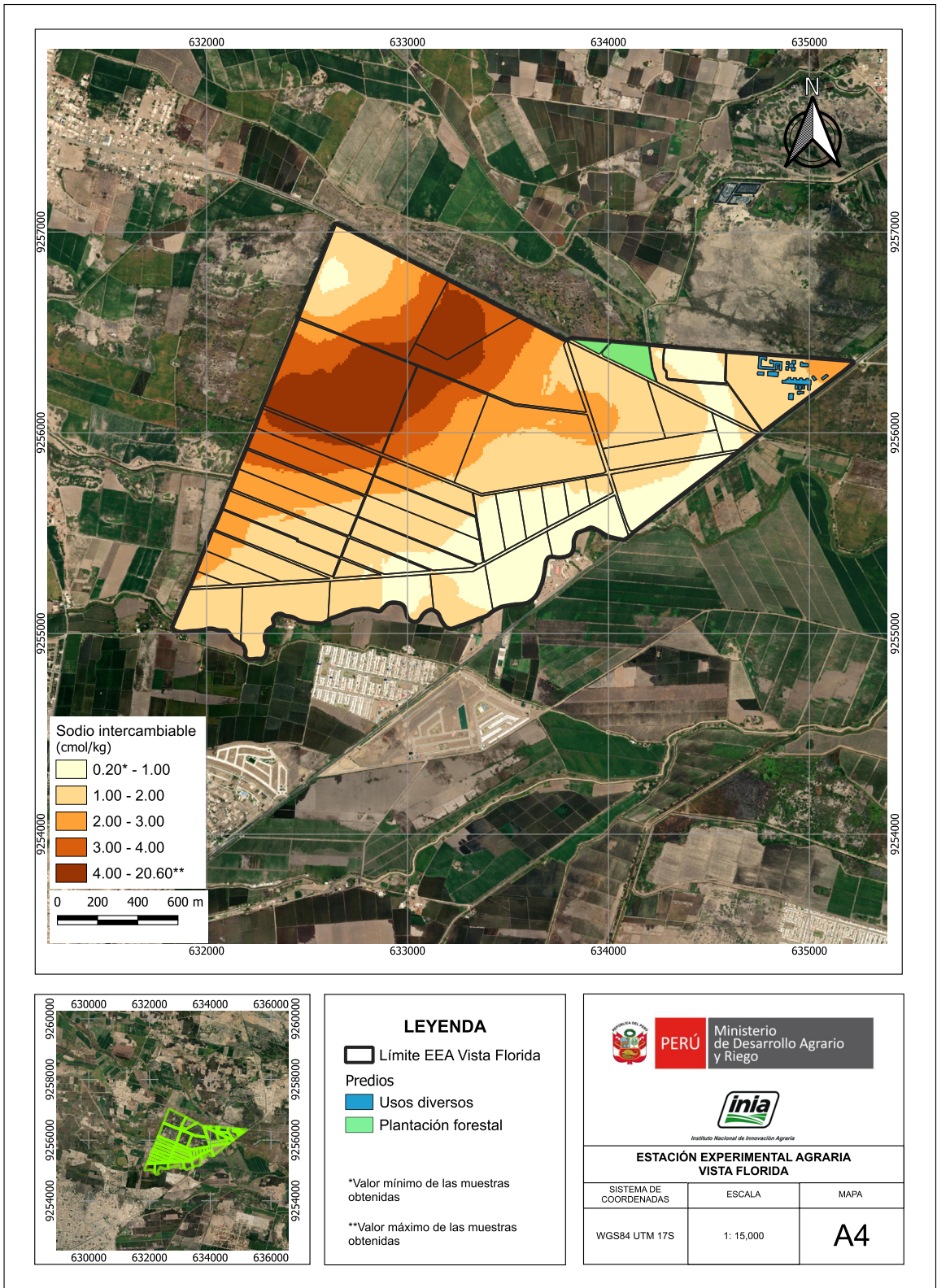


Figura 19. Mapa de variación espacial de sodio (Na⁺) intercambiable

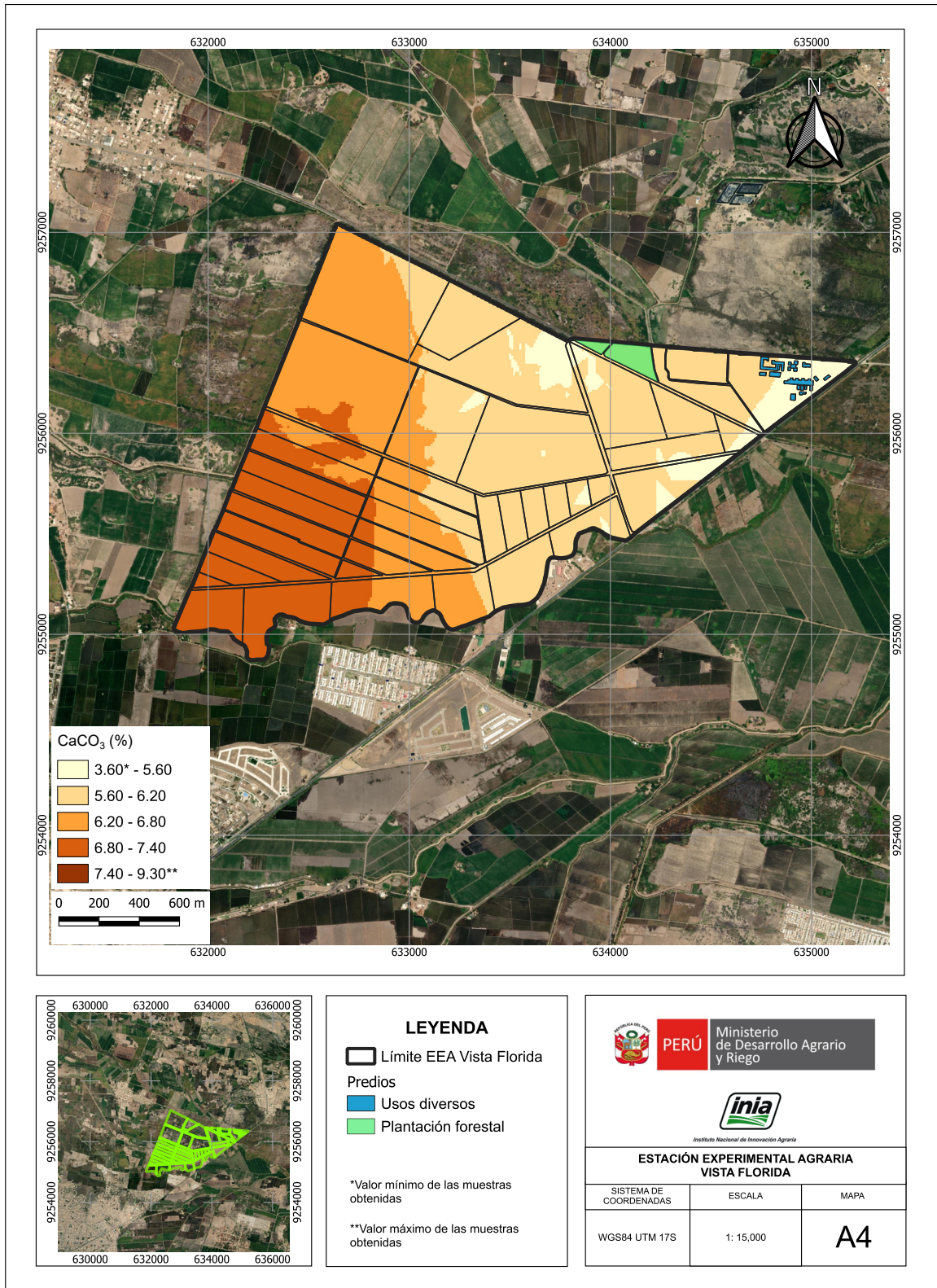


Figura 20. Mapa de variación espacial del porcentaje carbonato de calcio (CaCO₃)



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Vista Florida

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

En suelos fuertemente calcáreos y alcalinos, los sitios de intercambio catiónico están saturados, principalmente, por Ca^{2+} y Mg^{2+} . En los suelos evaluados de la EEA Vista Florida, el potasio intercambiable presentó valores promedio adecuados en el complejo de cambio ($1.25 \text{ cmol kg}^{-1}$), con una variabilidad moderada ($\text{SD} = 0.84$) (ver Tabla 2). En los suelos ligeramente alcalinos ($\text{pH} = 7.55$) y de alta saturación por Ca^{2+} ($47.82 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Mg^{2+} ($3.84 \text{ cmol kg}^{-1}$), el K^+ tiende a ser desplazado a posiciones menos estables del complejo de intercambio, lo que puede reducir su disponibilidad para los cultivos en condiciones de alta competencia catiónica.

Sin embargo, es preciso recalcar que en estos suelos calcáreos el uso del método estándar de extracción con acetato de amonio 1N (a $\text{pH} 7.0$) para la cuantificación Ca^{2+} intercambiable suele sobreestimar su valor real, debido a la disolución parcial de carbonatos (CaCO_3) y/o sulfatos durante el ensayo. Esta reacción libera calcio no estrictamente intercambiable al extractante y puede sesgar la estimación del Ca absoluto y sus magnitudes derivadas (capacidad de intercambio catiónica efectiva y saturación de bases). Esta condición, pone en riesgo la validez de índices basados en relaciones catiónicas (ej. Ca/K , Ca/Mg y el enfoque BCSR). Por ende, el uso del K disponible como variable de referencia toma relevancia para los cálculos de fertilización mediante el enfoque SLAN.

Los indicadores geoestadísticos del K^+ disponible mostraron una estructura espacial bien definida, con un modelo lineal, *nugget* (C_0) de 0.107, *sill* ($C_0 + C$) de 0.265 y un alcance de 1204 m. El ajuste del modelo fue alto ($R^2 = 0.805$) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue baja (0.009), lo que refleja una alta precisión en la predicción espacial de esta variable. Esta estabilidad espacial indica que el mapeo del K^+ intercambiable es confiable y puede ser utilizado en la planificación de estrategias de fertilización sitio-específicas. Se identificaron tres zonas con altos niveles de K (Figura 21): la primera con valores entre $540\text{-}1901.6 \text{ mg kg}^{-1}$, la segunda con valores entre $480\text{-}540 \text{ mg kg}^{-1}$, y la última con valores entre $420\text{-}480 \text{ mg kg}^{-1}$.

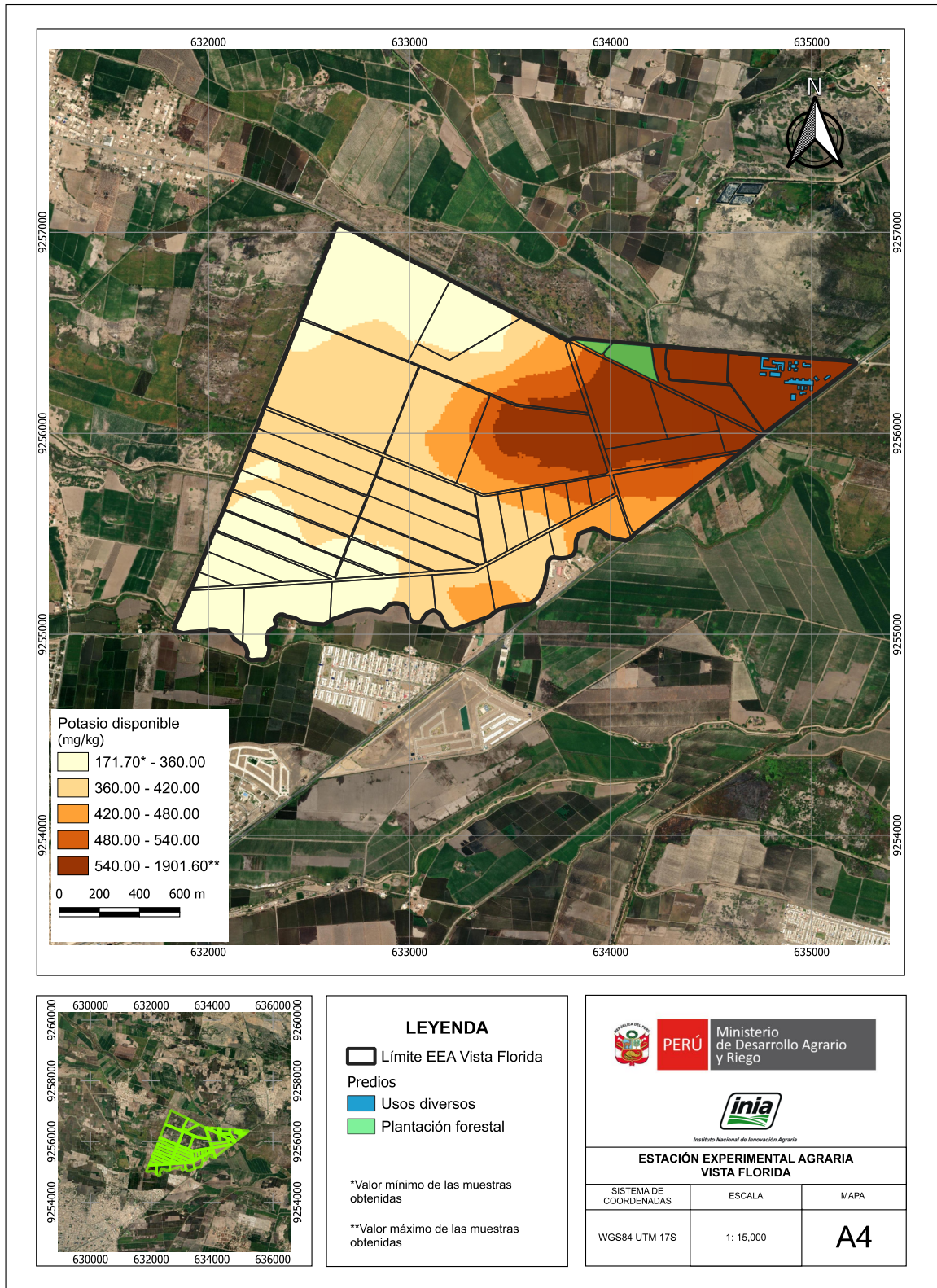


Figura 21. Mapa de variación espacial del potasio (K⁺) disponible

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

Para la interpretación de los niveles de suficiencia de nutrientes disponibles, se usará de ejemplo al cultivo de caña de azúcar. El fósforo (P) es un macronutriente estructural y regulador esencial en la fisiología de las plantas cultivo, pues interviene directamente en el metabolismo de azúcares. A nivel celular, el P modula la actividad y regulación de enzimas clave de partición y almacenamiento de carbohidratos (sacarosa fosfato sintasa y la ADP glucosa pirofosforilasa) con efectos directos sobre la síntesis, translocación y acumulación de sacarosa en los entrenudos (Crafts-Brandner, 1992). Por tanto, desde el punto de vista fisiológico la fertilización debe optimizar la disponibilidad del P en la rizósfera en momentos críticos (brotación, máxima elongación radicular y desarrollo de entrenudos) para permitir la expresión de procesos energéticos y enzimáticos que sostienen el macollamiento, acumulación de sacarosa y la capacidad de rebrote en socas. Además, la evidencia aplicada ha demostrado que las estrategias que mejoran la disponibilidad y la eficiencia del P (fertilización localizada, enmiendas orgánicas y estimulación de la ramificación radicular) son coherentes con los mecanismos fisiológicos descritos y pueden reducir dosis sin comprometer productividad (Soltangheisi et al., 2019).

En suelos calcáreos, la disponibilidad de P se ve condicionada principalmente por procesos de precipitación con cationes como el Ca^{2+} , altamente saturante en estas condiciones edáficas. En la EEA Vista Florida, la alta concentración de Ca^{2+} ($47.82 \text{ cmol kg}^{-1}$) favorece la formación de compuestos de baja solubilidad como hidroxiapatita y fosfatos tricálcicos, reduciendo la fracción de fósforo presente como fosfato monovalente (H_2PO_4^-), que es la forma más asimilable por las raíces. Por ello, la interpretación de los resultados de laboratorio y las decisiones de fertilización deben considerar la naturaleza calcárea del suelo y su pH.

En la EEA Vista Florida, el P disponible presentó una media de $26.89 \pm 14.46 \text{ mg kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación de 47.49 % (Tabla 2), reflejando una alta heterogeneidad espacial y la coexistencia de zonas deficitarias y zonas con exceso. El análisis geoestadístico reveló que esta variable se ajustó a un modelo lineal, con un alcance espacial de 1 760 m y un R^2 de 0.729, lo que indica que existe una estructura espacial consistente que permite generar mapas de predicción con un nivel de confiabilidad aceptable. Este comportamiento espacial respalda la aplicación de manejo sitio-específico bajo el enfoque de suficiencia (SLAN). De esta manera, se han delimitado tres zonas predominantes (Figura 22).

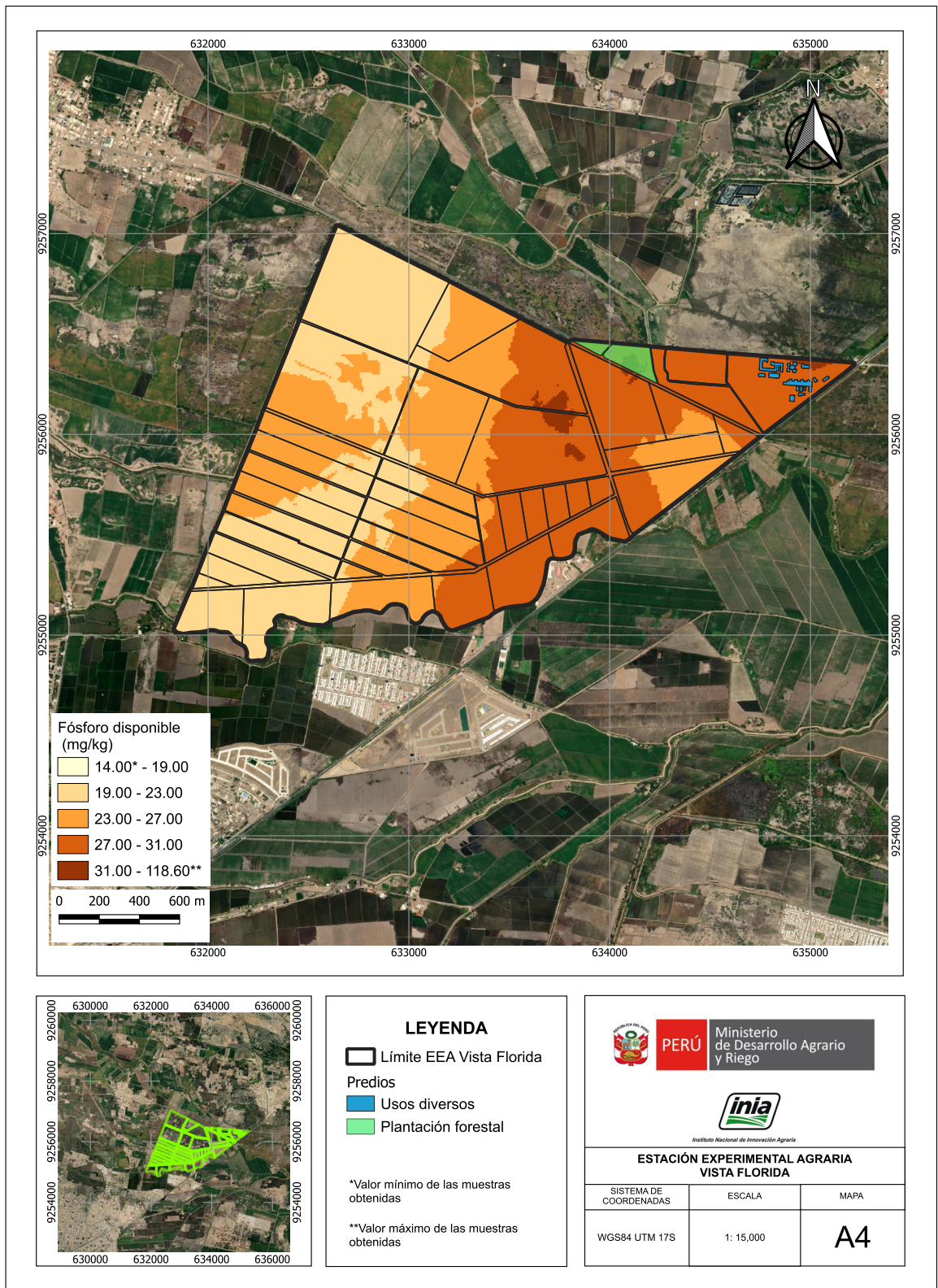


Figura 22. Mapa de variación espacial del fósforo (P) disponible

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de caña de azúcar, se tomó como referencia un nivel crítico de 15 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 200 t ha^{-1} . Por ende, se observa que en todas las zonas delimitadas el nivel de fósforo es suficiente para el cultivo y no se espera un incremento en la producción a mayores niveles de la fertilización fosforada. En este sentido, se considerará el plan de fertilización en función al criterio de suficiencia, para reponer lo extraído por la cosecha. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Primer paso: como ya se explicó líneas arriba, el nivel de fósforo en el suelo es superior al nivel crítico, por lo que el rendimiento relativo del cultivo es del 100 %. Dicho en otras palabras, el cultivo expresará su rendimiento potencial de 200 t ha^{-1} . Por ende, al aplicar la fórmula 2 se tiene:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{100 \times 200 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 200 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes de la caña utilizando la fórmula 3. Cabe señalar que en este cultivo los tallos forman parte del producto comercial (rendimiento alcanzado). Sin embargo, este paso considera el incremento en biomasa no comercial del cultivo, por lo que se cambiará la denominación de la fórmula 3 a incremento en residuo agrícola. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que este incremento es el 30 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.30 \times 200 \text{ t ha}^{-1} = 60 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 200 t ha^{-1} de producción, el cultivo genera 60 t ha^{-1} de biomasa de residuo agrícola, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

Tercer paso: determinar el rendimiento objetivo, añadiendo el residuo agrícola de la caña al rendimiento alcanzado, como se señala en la fórmula 4:

$$\text{Rendimiento objetivo} = 60 \text{ t ha}^{-1} + 200 \text{ t ha}^{-1} = 260 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 0.2 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 0.2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 260 \text{ t ha}^{-1} = 52 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 52 kg de P para reponer el fósforo extraído en la producción de 260 t de biomasa de caña de azúcar ha^{-1} , el cual está conformado por 200 t ha^{-1} de rendimiento y 60 t de residuo agrícola ha^{-1} . Así mismo, la dosis de fertilización anual sería de 229 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (52 % de P_2O_5). Con esta dosis anual de fertilizante, se logra reponer el P extraído por el rendimiento producido en el sistema productivo de la caña.

4.3. El pH del suelo

En los suelos de la EEA Vista Florida, los principales problemas identificados son la alcalinidad y, en menor medida, la salinidad. Los suelos presentan 6.23 % CaCO_3 en promedio, mientras que los valores de pH varían entre 7 y 8 con una media de 7.5 (Tabla 2). Estas condiciones favorecen la precipitación y fijación de micronutrientes como Fe, Zn y Mn en formas poco solubles, reduciendo su disponibilidad para las plantas y generando diferentes grados de deficiencia nutricional en el área de estudio. Esta situación es típica de suelos calcáreos, donde los altos niveles de Ca^{2+} y la elevada saturación de bases desplazan el equilibrio químico hacia la formación de hidróxidos y carbonatos de micronutrientes.

Los indicadores geoestadísticos obtenidos (Tabla 3) para el pH del suelo mostraron un valor de *nugget* (C_0) bajo (0.03), lo que sugiere una baja variabilidad a microescala, es decir, los valores de pH no cambian de forma significativa a distancias muy cortas. Asimismo, el valor del *sill* ($C_0 + C$) fue de 0.08, confirmando que la variabilidad del pH del suelo sigue siendo baja incluso a mayor escala espacial, lo cual es consistente con una distribución homogénea del pH en el área de estudio. Además, el coeficiente de determinación (R^2) fue alto (0.89), lo que implica un elevado grado de ajuste entre los valores observados y predichos en la EEA Vista Florida, lo cual confirma la validez del modelo para identificar patrones espaciales significativos.





5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- 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>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cs2018.51.0101>
- Crafts-Brandner, S. J. (1992). Phosphorus nutrition influence on starch and sucrose accumulation, and activities of ADP-glucose pyrophosphorylase and sucrose-phosphate synthase during the grain filling period in soybean. *Plant Physiol.* 98(3):1133-1138. <https://doi.org/10.1104/pp.98.3.1133>
- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparacio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. 2025. Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., y Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- 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>
- de Valença, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., y Fonte, S. J. (2017). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *Ecological Applications*, 27(4), 1138–1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- 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* (1.ª 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*. University of Missouri, Agricultural Experiment Station.
- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss58-014>
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil* 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Heuvelink, G. B. M., y Webster, R. (2022). Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure. *Spatial Statistics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100639>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). Mapa de suelos del Perú.
- International Organization for Standardization. (1994). Soil quality — Determination of specific electrical conductivity.
- International Organization for Standardization. (1995). Soil quality — Determination of total nitrogen — Modified Kjeldahl method.
- 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>
- Lark, R. M., Lapworth, D. J., y Hobbs, P. R. N. (2017). Variación espacial del fósforo del suelo e implicaciones agronómicas: Estudio de caso en una zona tropical. *Geoderma*, 296, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.014>
- 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, *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). <https://doi.org/10.2134/asapecpub29.c3>

- Moral, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9–13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-base and excess-base/nitrogen ratio of various crop species and parts of plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Soltangheisi A., Withers P. J. A., Pavinato P. S., Cherubin, M. R., Rossetto, R., Braga C., J., Casoni R., G. y Martinelli, L. A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. *GCB Bioenergy*, 11(12), 1444-1455. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12650>
- Teixeira, W. G., Alvarez V, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://www.rbcjournal.org/article/evaluation-of-traditional-methods-for-estimating-lime-requirement-in-brazilian-soils/>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Tesis de grado de Magister en ciencias, University of Hawaii at Manoa]. ScholarSpace. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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

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 Chíncha - Ica





Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-240-7



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

