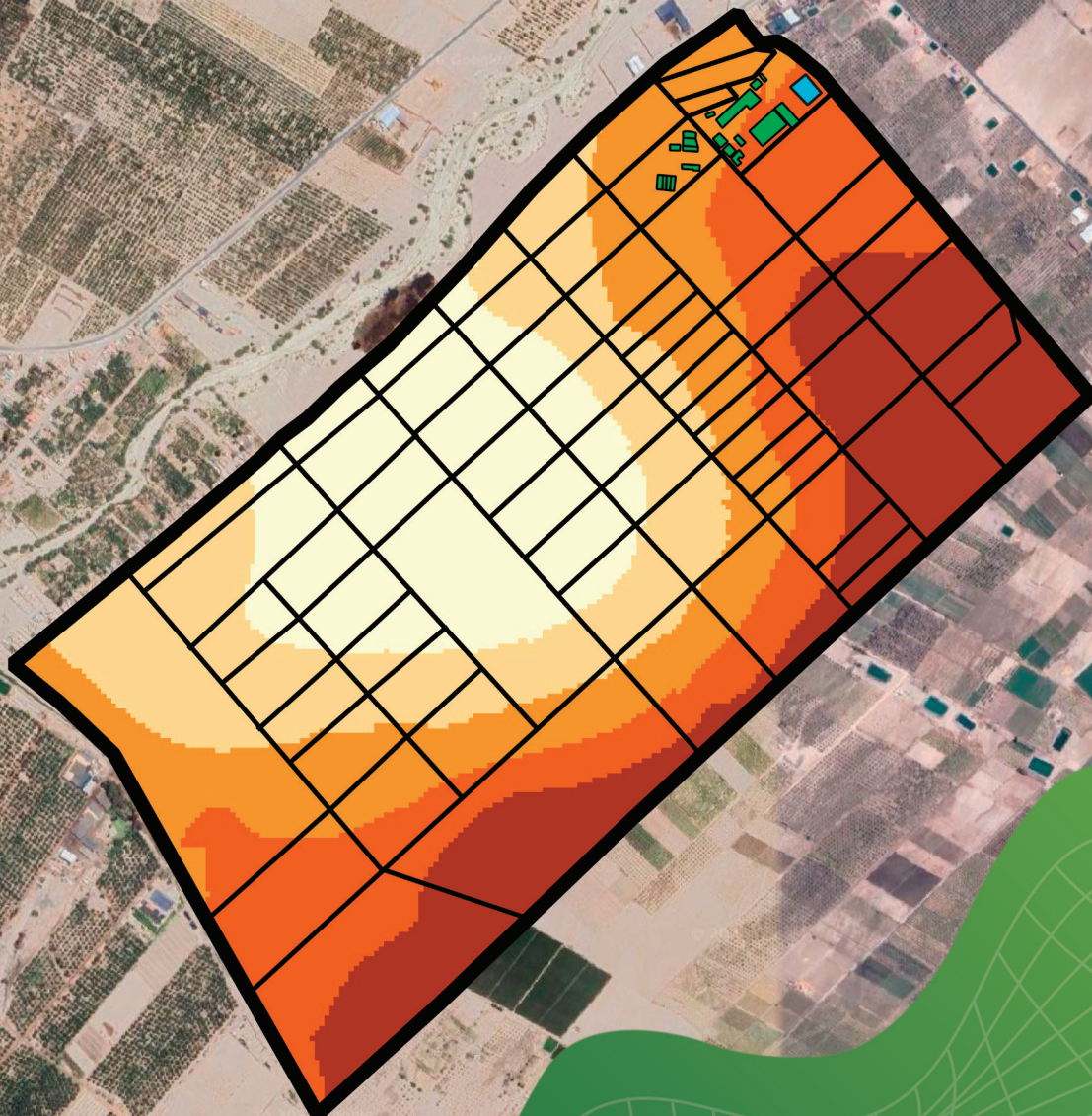


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Tacna



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 Tacna



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA TACNA

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:

Mayo, 2026

Publicado:

Mayo, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-257-5

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° 2026-05584

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Ruth L. Mercado-Chinchay, Ruddy A. Ore-Valeriano, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Susy P. Layme-Quispe, Justino Palma-Quispe, Francisco A. Cahui-Azorza, 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	20
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	22
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Tacna	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	33
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	33
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	33
3.7.3. Validación cruzada	33
3.8. Resultado del análisis geoestadístico de las propiedades fisicoquímicas 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 Tacna	57
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	57
4.1.1. Variación espacial de las relaciones catiónicas en suelos salino-sódicos	57
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	62
4.2.1. Cálculos de requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el olivo	62
4.2.2. Cálculos de requerimiento de fertilización potásica de mantenimiento y construcción para el olivo	63
5. Referencias bibliográficas	67



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla investigación, transferencia de tecnología, asistencia técnica, conservación y puesta en valor de recursos genéticos, la extensión agropecuaria y producción de semillas, plantones y reproductores de alto valor genético.

El INIA, a través de la Dirección de Servicios Estratégicos Agrarios (DSEA), viene ejecutando el proyecto de inversión “Mejoramiento de los servicios de investigación y transferencia tecnológica en el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados y aguas para riego en la pequeña y mediana agricultura en los departamentos de Lima, Áncash, San Martín, Cajamarca, Lambayeque, Junín, Ayacucho, Arequipa, Puno y Ucayali”, con Código Único de Inversiones N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

En el Departamento de Tacna, el estudio de la fertilidad del suelo constituye un aspecto fundamental para optimizar la productividad agrícola, mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y promover la sostenibilidad de los sistemas de producción. En este contexto, la agricultura de precisión, apoyada en herramientas geoestadísticas y sistemas de información geográfica (SIG), permite analizar y representar espacialmente las propiedades edáficas, facilitando la generación de información técnica para un manejo más eficiente del suelo y del agua. Bajo este enfoque, la Estación Experimental Agraria (EEA) Tacna, constituye un escenario estratégico para el desarrollo de investigaciones orientadas al diagnóstico de la fertilidad del suelo y a la generación de información técnica de base para futuros estudios y estrategias de manejo sostenible en la región.

El presente documento, titulado “Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Tacna”, describe el proceso de muestreo, así como el análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades edáficas. Asimismo, expone de manera sistemática la metodología empleada en el análisis geoespacial, destacando su carácter replicable y su aplicabilidad en diversos sistemas agrícolas. Finalmente, presenta una evaluación detallada del edafosistema en la zona de estudio, proporcionando insumos técnicos que contribuyen a la toma de decisiones orientadas a una gestión agrícola sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

La región Tacna constituye un territorio estratégico para la producción de cultivos de alto valor, como el olivo, el orégano y la alfalfa (Sistema Integrado de Estadística Agraria [SIEA], 2025). Sin embargo, presenta condiciones edafoclimáticas predominantemente áridas que restringen el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles. En este contexto, la conservación y el manejo adecuado del suelo adquieren un rol determinante para sostener la productividad, especialmente frente al desafío global de incrementar la producción de alimentos sin comprometer los recursos naturales ni el equilibrio ambiental (Mrabet, 2023).

El clima árido de Tacna se caracteriza por un régimen de precipitaciones extremadamente escaso e irregular, así como por una limitada disponibilidad de recursos hídricos superficiales, lo que compromete la viabilidad del riego agrícola. La acumulación progresiva de sales, intensificada por el uso de aguas de riego de menor calidad durante periodos de sequía, provoca un deterioro significativo de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esta degradación repercute directamente en la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo del sistema radicular, reduciendo considerablemente el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Demo et al., 2025). Así mismo, las condiciones de salinidad y estrés hídrico afectan la estructura del suelo, su fertilidad y capacidad de retención de agua, lo que limita aún más la productividad agrícola (Shokri et al., 2024). Además, la salinidad y sodicidad constituyen problemas edáficos de marcada variabilidad espacial en los suelos agrícolas, por lo que requieren un monitoreo preciso basado en el modelamiento predictivo de sus componentes (Wang et al., 2025). En este contexto, la carencia de herramientas técnicas para la adecuada interpretación de la fertilidad de los suelos en condiciones áridas representa una limitante crítica para la toma de decisiones en el manejo de la fertilización.

El monitoreo de la fertilidad del suelo es un componente clave para la gestión sostenible de la agricultura, particularmente en entornos áridos donde los recursos edáficos e hídricos son escasos. En este sentido, la incorporación de enfoques de agricultura de precisión en los programas de fertilización, basados en la integración de la geoestadística, el análisis de suelos y los sistemas de información geográfica (SIG), permite evaluar la variabilidad espacial de la fertilidad mediante técnicas como el análisis de variogramas, la interpolación por *kriging* y el índice de Moran. La información derivada de estos métodos facilita la delimitación de zonas de manejo específico, optimiza el uso de insumos agrícolas y contribuye a la conservación de la calidad del suelo en el largo plazo (Culman et al., 2021; Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

En este sentido, el presente documento técnico tiene como objetivo integrar la interpretación de análisis de suelos con herramientas de análisis espacial para evaluar la fertilidad en la Estación Experimental Agraria Tacna. Se describe de manera sistemática el procedimiento metodológico empleado, el cual es replicable y adaptable a otros contextos productivos, y orientado a la generación de mapas temáticos de propiedades edáficas. Estos productos constituyen insumos clave para la toma de decisiones en el manejo agronómico del suelo y contribuyen al fortalecimiento de una agricultura sostenible a nivel regional.



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, 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 Tacna del INIA.

b. Origen y aplicabilidad del concepto

El concepto de la relación de saturación de bases (BCSR, por sus siglas en inglés) se originó en los trabajos de William Albrecht durante la década de 1930, quien analizó 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). A partir de estudios realizados en suelos agrícolas de Misuri, Albrecht planteó que un balance adecuado entre calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) favorece la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular (Chaganti y Culman, 2017).

Esta propuesta sostiene que desviaciones respecto a proporciones consideradas óptimas de cationes intercambiables pueden restringir la absorción de nutrientes por las plantas, debido a que los desequilibrios iónicos afectan los procesos fisicoquímicos que regulan la reactividad, disponibilidad y dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta. Dichos procesos se encuentran asociados a mecanismos de intercambio iónico entre la fase sólida y la solución del suelo, los cuales se ilustran en la Figura 1.

En este contexto, se reconoce que solo una fracción reducida de los nutrientes totales del suelo se encuentra en la solución del suelo o en formas inmediatamente disponibles para las plantas. Bajo este enfoque, cada uno de los componentes del sistema actúa como un reservorio dinámico de iones, en constante equilibrio entre las fases sólida y líquida del suelo (Quispe-Matos et al., 2025).

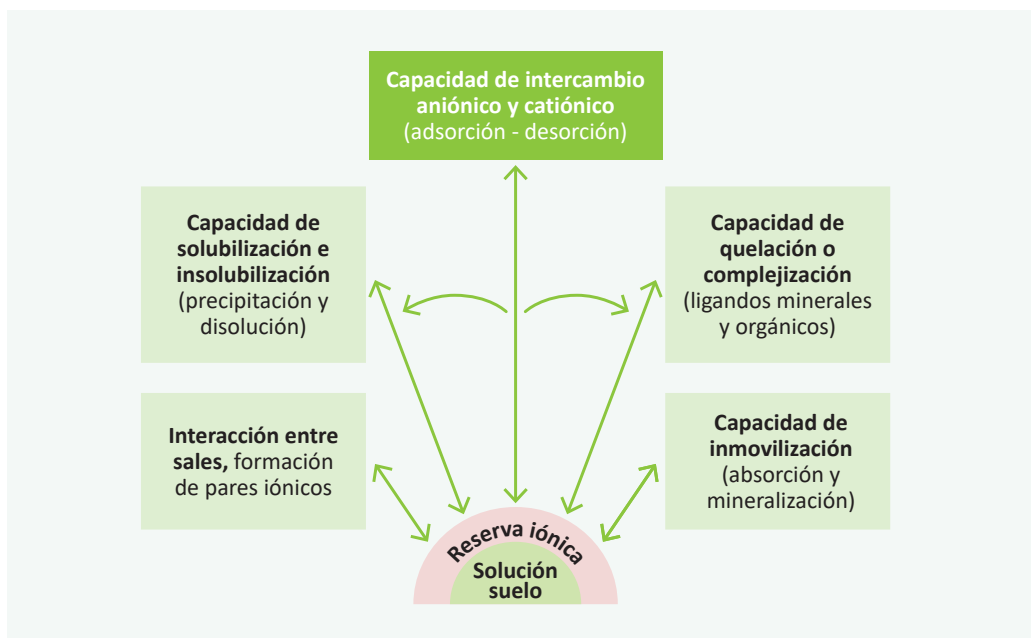


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

Los estudios de Bear et al. (1945), realizados en suelos agrícolas de Nueva Jersey, aportaron evidencia empírica que respaldó parcialmente la hipótesis propuesta por William Albrecht. De acuerdo con estos trabajos, posteriormente complementados por Halstead et al. (1958) y Graham (1959), en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) la saturación de bases considerada adecuada se distribuye aproximadamente en 65-75 % de Ca^{2+} , 10-15 % de Mg^{2+} , 3-7 % de K^+ y menos del 5 % de Na^+ . En este esquema, el hidrógeno (H^+) y el aluminio (Al^{3+}) deben mantenerse en niveles reducidos, generalmente inferiores al 15 %, con el fin de minimizar riesgos de acidez y toxicidad en el suelo. A partir de estos resultados, el enfoque de la relación de saturación de bases (BCSR) fue promovido como criterio para la formulación de programas de fertilización y manejo de enmiendas (Zhang, 1999).

En décadas recientes, diversos estudios han contrastado la eficacia del BCSR con el sistema de suficiencia de nutrientes (SLAN), evidenciando que, en muchos casos, la disponibilidad absoluta de nutrientes constituye un mejor predictor del rendimiento de los cultivos que la proporción relativa de cationes (Brock et al., 2021). No obstante, en suelos con alta CIC (por ejemplo, $> 8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), bajos contenidos de carbonatos, condiciones de lixiviación intensiva o desbalances marcados de bases intercambiables, el BCSR puede mantener utilidad como herramienta diagnóstica complementaria para identificar y corregir desequilibrios iónicos (Quispe-Matos et al., 2025).

El pH del suelo es una de las variables más importantes en la toma de decisiones agronómicas, dado que permite identificar la necesidad de corregir desbalances iónicos. Este parámetro determina si se requiere la aplicación de cal o yeso agrícola para contrarrestar el exceso de Al^{3+} o Na^+ , respectivamente. Ambos insumos contienen alto contenido de calcio (Ca^{2+}) y son las principales herramientas para aumentar la saturación

de Ca^{2+} y reducir la de Mg^{2+} , Na^+ y Al^{3+} . La cal y el yeso pueden generar efectos positivos y negativos sobre las propiedades del suelo y la producción vegetal, principalmente a través de tres mecanismos: elevación del pH, incremento de la saturación de Ca^{2+} o aumento de los niveles de azufre (S). El criterio de uso y las respuestas en el suelo se ilustran en la Figura 2 (Espinosa y Molina, 1999).

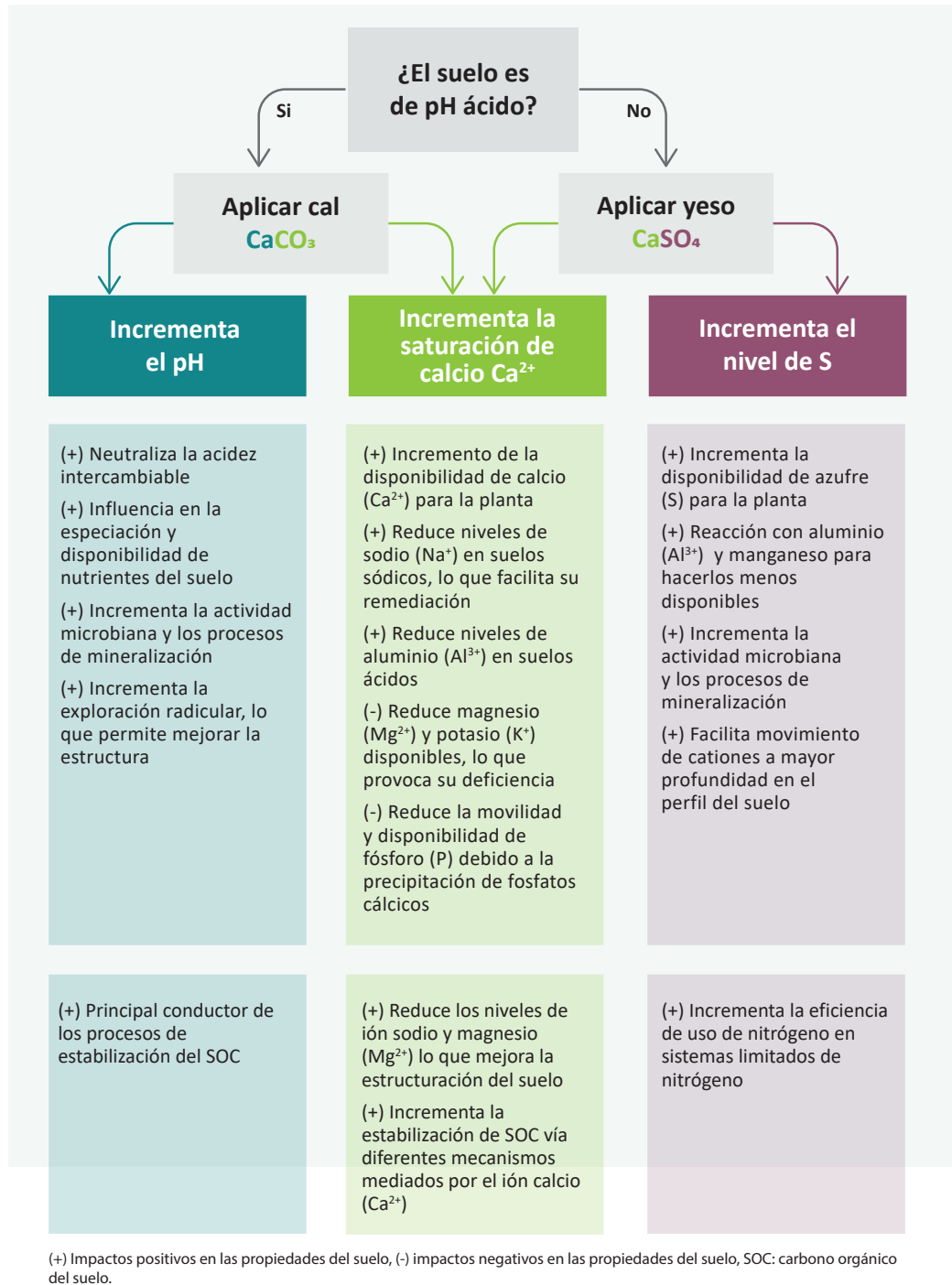


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

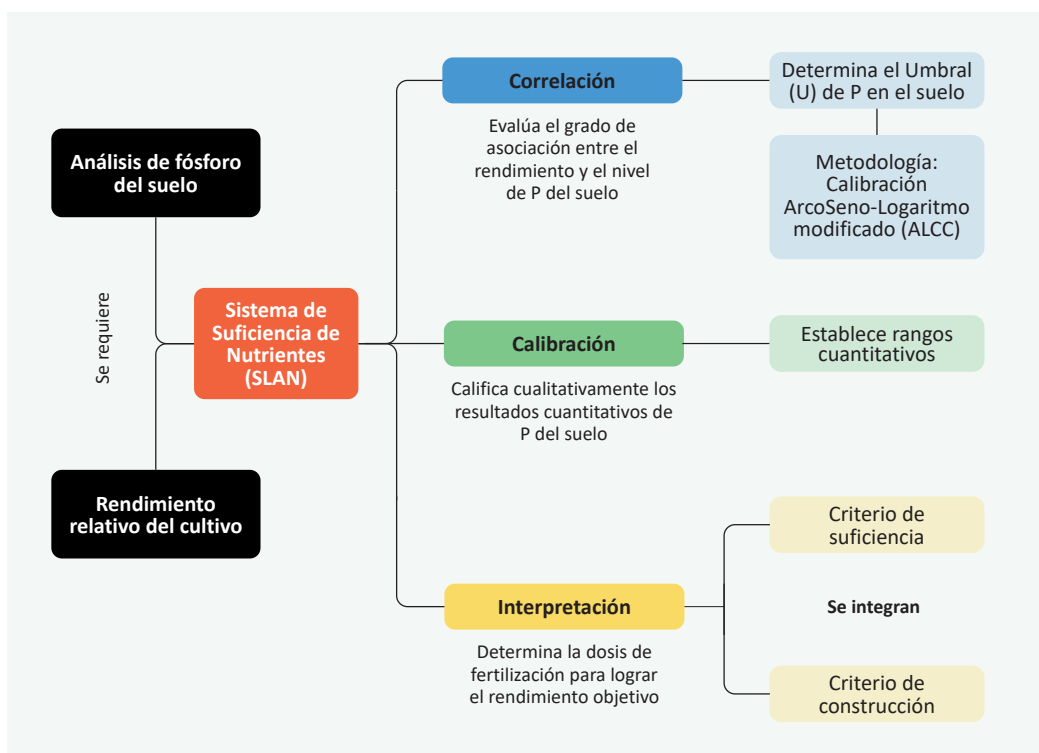


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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 suelo indica un contenido alto de nutriente, 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.

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelo en una plantación de olivo, y se obtuvo 6 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 8 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 20 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 70 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = 0,7 \times 20 \text{ t ha}^{-1} = 14 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (6 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (8 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 70 % del potencial, 14 t ha⁻¹ en lugar de 20 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.

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 14 \text{ t ha}^{-1} = 4,9 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 14 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 4,9 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:

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 4,9 \text{ t ha}^{-1} + 14 \text{ t ha}^{-1} = 18,90 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 2 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2,0 \text{ kg de P t}^{-1} \times 18,9 \text{ t ha}^{-1} = 37,80 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 37,80 kg de P para alcanzar un rendimiento objetivo de 18,90 t ha⁻¹, el cual está conformado por 14 t ha⁻¹ de producción y 4,90 t ha⁻¹ de raíces y brotes.

c. Aplicación de los criterios de construcción y mantenimiento

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 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 olivo para la aplicación del criterio de mantenimiento, así como de los criterios de mantenimiento y construcción (adaptado de Quispe-Matos et al., 2025).

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de olivo, y se obtuvo 4 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 8 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 20 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 40 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 20 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 8 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 8 \text{ t ha}^{-1} = 2,8 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2,8 \text{ t ha}^{-1} + 8 \text{ t ha}^{-1} = 10,8 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 2 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 10,8 \text{ t ha}^{-1} = 21,6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

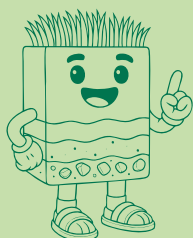
$$\text{RM de P} = \frac{21,6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 72 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de olivo es 72 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de olivo, y se obtuvo 2 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 8 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 20 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 2 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 2 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2.

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

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.

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

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

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

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos, se considera una extracción de 2 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 5,4 \text{ t ha}^{-1} = 10,80 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. El RM integra el requerimiento de P con el concepto de eficiencia de uso del nutriente en el sistema (la fracción del nutriente que realmente está disponible para el cultivo) y posibles pérdidas (por inmovilización, fijación, erosión o volatilización). Para este caso práctico, se considera una eficiencia de uso de P del 20 %.

$$\text{RM de P} = \frac{10,80 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,20} = 54 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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.

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

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

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

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

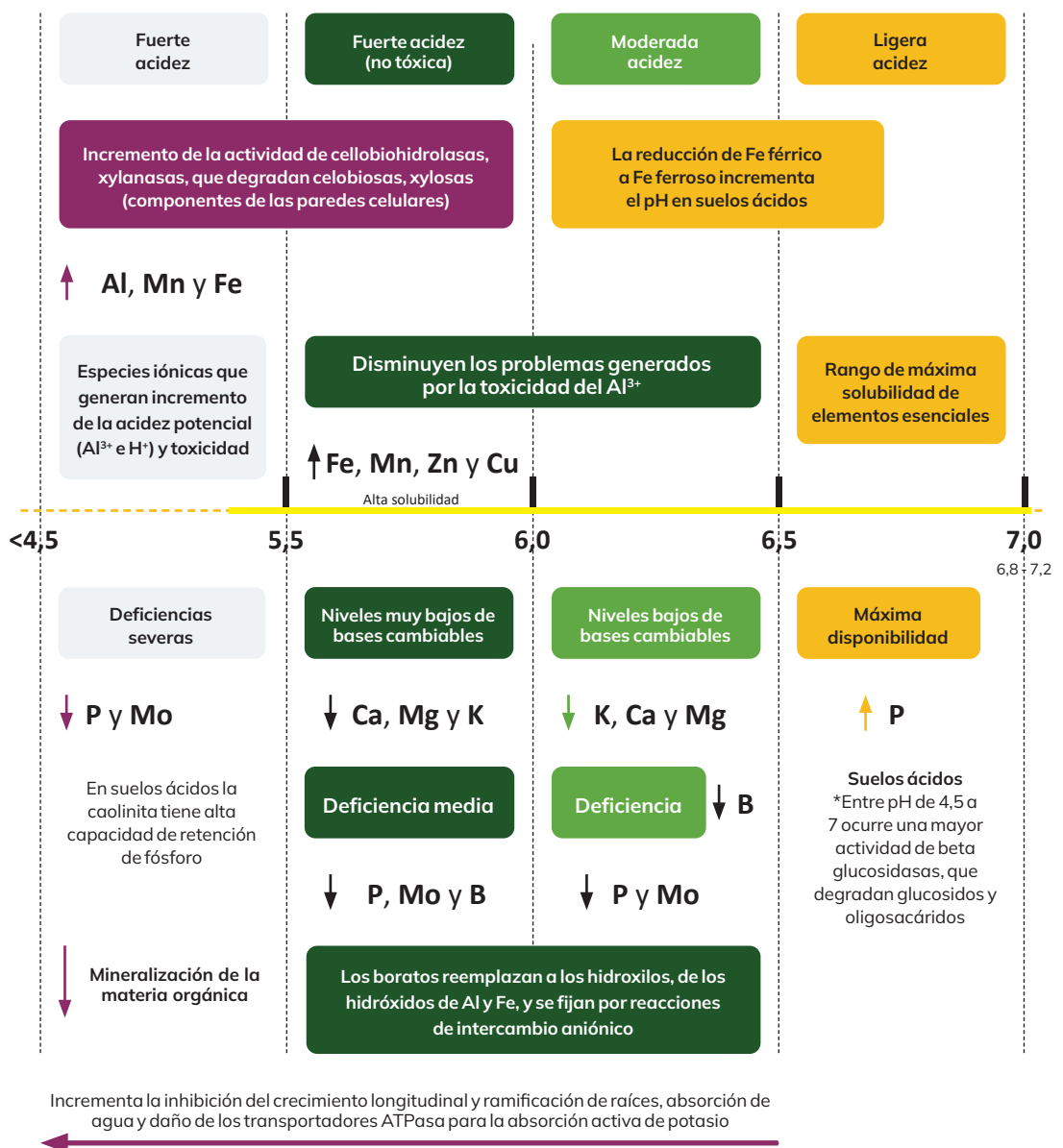
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 54 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13,5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 67,5 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de olivo es 67,5 kg de P por hectárea.

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

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

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



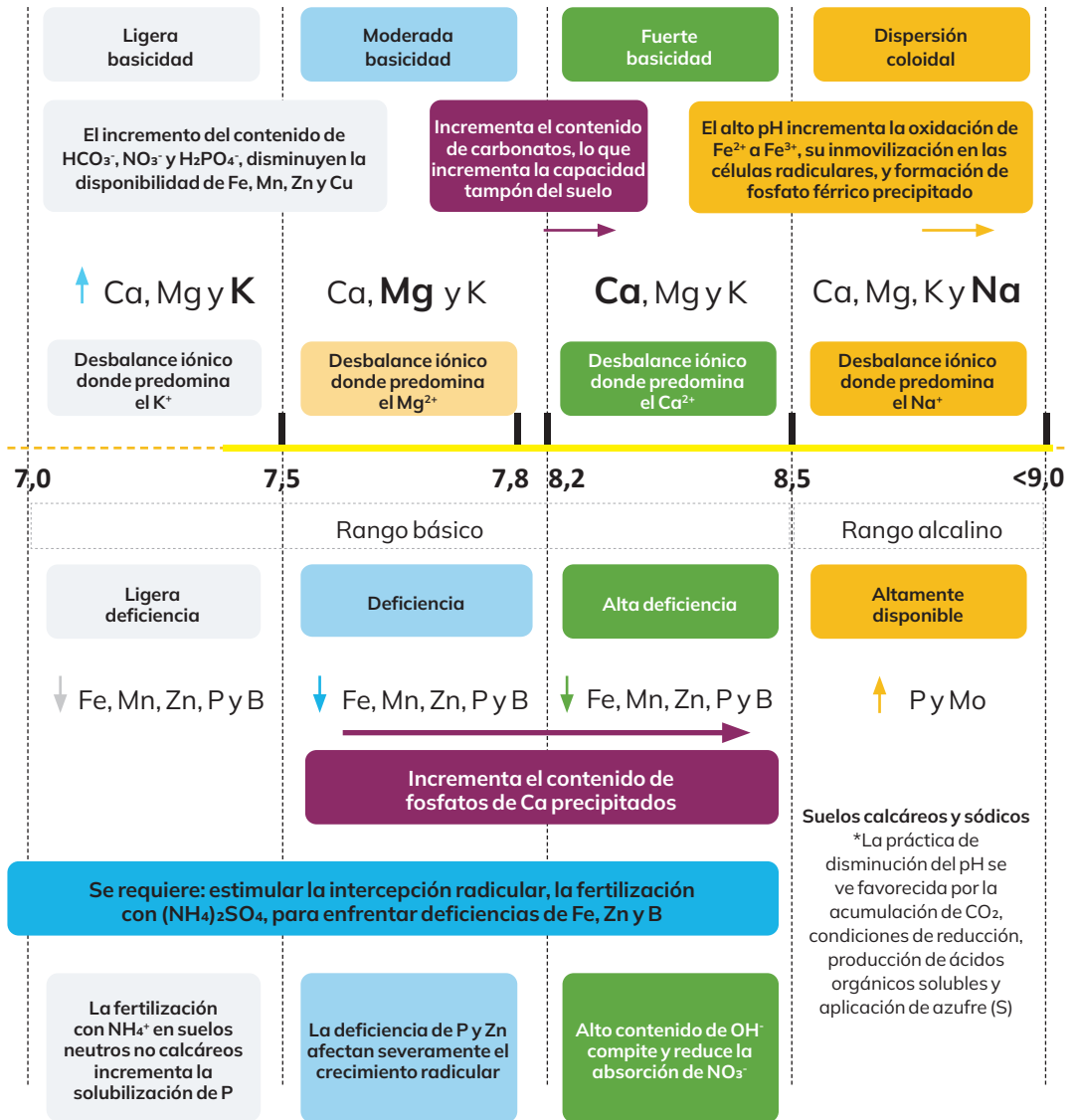


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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





3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Tacna

3.1. Ubicación

La EEA Tacna se encuentra en el departamento con el mismo nombre, cuenta con cuatro centros experimentales y un área total de 231,22 ha. En este espacio se realizan actividades de investigación, conservación y valoración de recursos genéticos, producción de material genético de plantas de calidad, extensión agropecuaria y brinda servicios a los agricultores de la región Tacna. Además, el muestreo se realizó específicamente en el Centro Experimental Los Palos (CE Los Palos), ubicado en el distrito La Yarada Los Palos, provincia Tacna, como se muestra en la Figura 5 (Cruz-Luis et al., 2025).

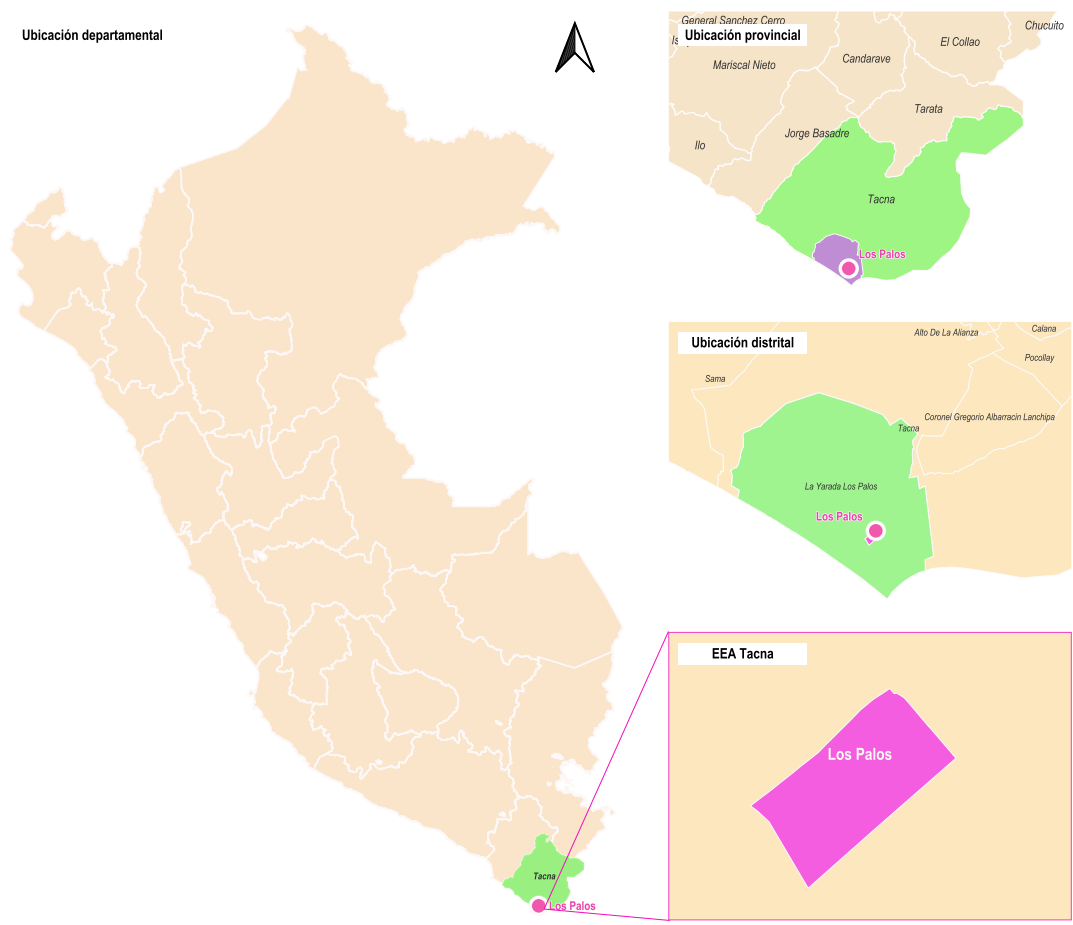


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Los Palos

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Para caracterizar adecuadamente la variabilidad espacial de las condiciones edáficas en el Centro Experimental Los Palos, se implementó un diseño de muestreo estratificado definido a partir de unidades de cobertura delimitadas mediante el análisis de imágenes satelitales. Este enfoque permite disminuir la variabilidad dentro de cada estrato y mejorar la representatividad de las muestras frente a la heterogeneidad espacial del área de estudio. La estratificación previa al muestreo favorece una descripción más precisa de las propiedades del suelo relevantes para su manejo, en el marco de un esquema integral de evaluación de la fertilidad. Para ello, se integraron técnicas de clasificación no supervisada con métodos de muestreo probabilístico espacial, apoyados en herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se describen los procedimientos utilizados para la definición y recolección de los puntos de muestreo (Figura 6).

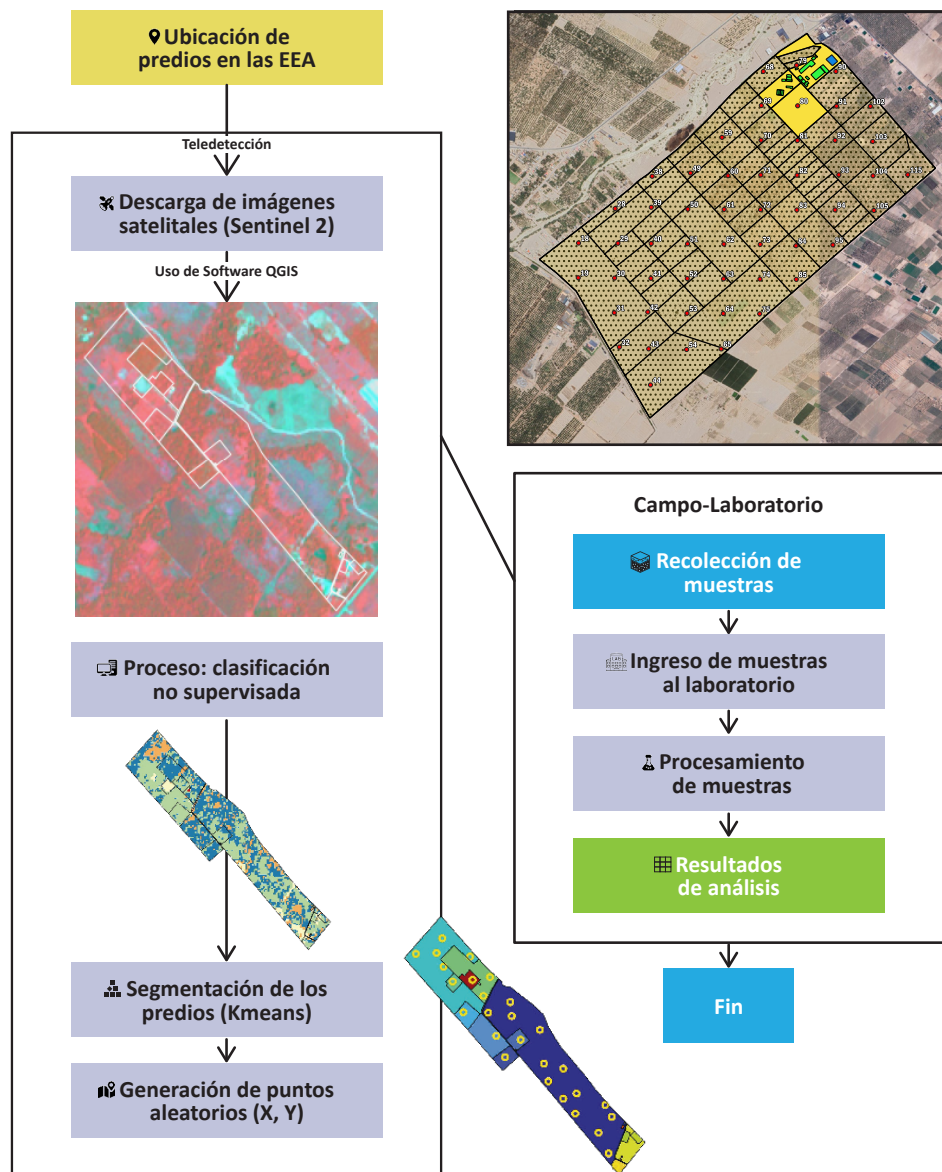


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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

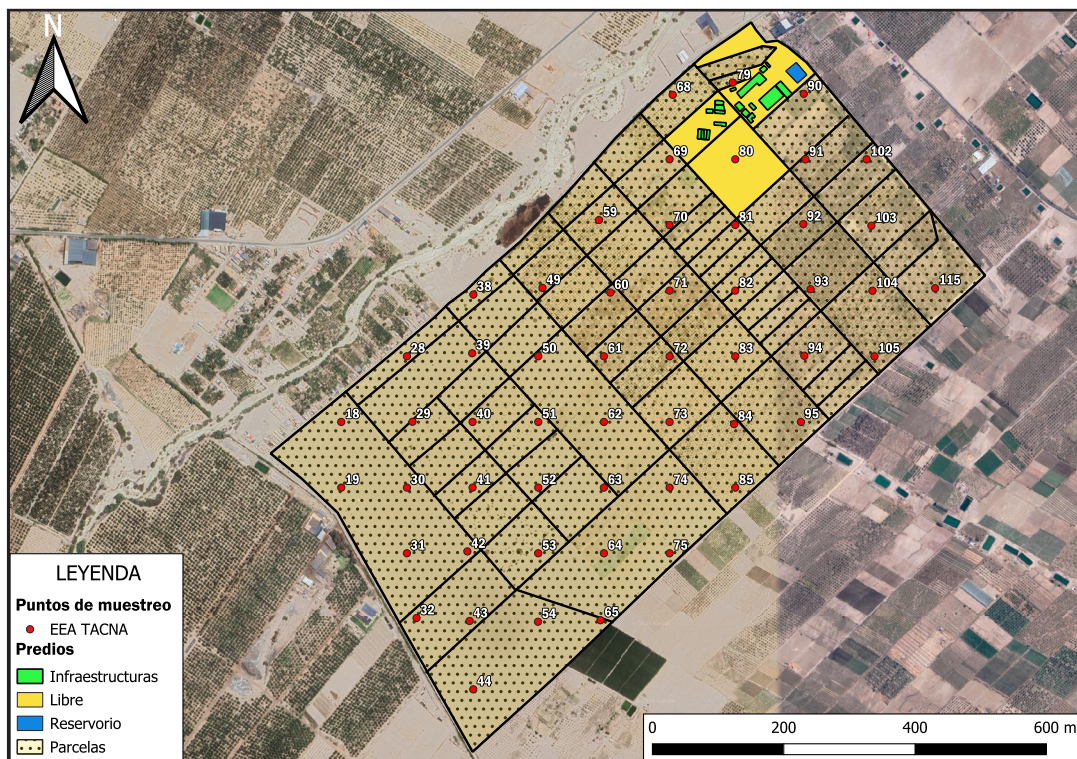


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en el Centro Experimental Los Palos

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 53 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 Foliar de la EEA Moquegua para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros determinados en las muestras colectadas y su metodología de análisis

Parámetro	Método de análisis	Referencias
Porcentaje de arena, limo y arcilla	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de densímetro tipo Bouyoucos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
pH (1:2,5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	ISO 11265: determinación de la conductividad eléctrica específica del suelo	International Organization for Standardization (ISO, 1994)
Carbonatos	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método del calcímetro.	SEMARNAT (2002)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black	SEMARNAT (2002)
N total	ISO 11261: determinación de Nitrógeno total por Kjeldahl Modificado	ISO (1995)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Olsen	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados se presentan en la Tabla 2, donde se muestran las estadísticas descriptivas obtenidas a partir de las 53 muestras analizadas del Centro Experimental Los Palos, de la EEA Tacna. Los suelos presentan en promedio una textura arenoso-franco (83,48 % de arena; 11,64 % de limo y 4,88 % de arcilla), con una variabilidad moderada a alta (CV entre 14,06 % y 94,71 %). La fracción arenosa exhibe una fuerte asimetría negativa, con poca frecuencia de valores bajos (*Skewness* = -4,57), mientras que el contenido de limo muestra una asimetría positiva pronunciada (*Skewness* = 5,18), lo que indica predominancia de zonas con menor proporción de limo. Esta textura, predominantemente arenosa, favorece el drenaje y la aireación del suelo, pero limita la retención de agua y nutrientes, una característica habitual en las condiciones áridas de Tacna.

El pH promedio ($7,08 \pm 0,36$) indica suelos ligeramente neutros, con baja variabilidad (CV = 5,05 %) y valores que oscilan entre 6,30 y 8,30, lo cual refleja condiciones químicas generalmente adecuadas para la mayoría de los cultivos, aunque con presencia localizada de suelos tendientes a la alcalinidad. La conductividad eléctrica promedio ($4,15 \text{ dS m}^{-1} \pm 6,28$) revela una salinidad moderada a alta, con muy alta variabilidad (CV = 151,32 %) y valores extremos de hasta $28,80 \text{ dS m}^{-1}$. Esto sugiere la coexistencia de áreas sin restricciones severas y otras con fuerte acumulación de sales, posiblemente asociadas a la calidad del agua de riego o a procesos de evaporación intensa.

El contenido de materia orgánica promedio es bajo ($0,34 \% \pm 0,22$; CV = 63,47 %), lo que refleja una fertilidad orgánica limitada y una actividad biológica reducida, situación típica en suelos áridos. De igual forma, el nitrógeno total (0,02 %) muestra bajos niveles y moderada variabilidad, confirmando la pobreza general de materia orgánica y nitrógeno. Los carbonatos de calcio ($0,69 \% \pm 0,21$) son bajos, con moderada variación entre muestras, lo que indica que la alcalinidad observada en algunos puntos no se asocia a acumulaciones significativas de CaCO_3 .

Respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo ($122,11 \text{ mg kg}^{-1} \pm 172,96$), presenta una alta variabilidad (CV = 141,65 %) y asimetría positiva (*Skewness* = 3,08), reflejando la existencia de áreas enriquecidas por fertilización puntual o acumulación superficial. El potasio disponible es moderadamente alto ($260,37 \text{ mg kg}^{-1} \pm 172,88$), aunque también heterogéneo (CV = 66,40 %), con valores máximos de hasta $935,81 \text{ mg kg}^{-1}$. Estos valores excesivos de fósforo y potasio son considerados valores atípicos producto de acumulación constante de fertilizantes, característica negativa en suelos salinos.

En el complejo de intercambio catiónico, el sodio predomina con valores muy altos ($12,57 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 20,95$), llegando en algunos sectores hasta $108,23 \text{ cmol kg}^{-1}$, y presenta una variabilidad extrema (CV = 166,67), lo que indica riesgo de sodicidad localizada. Le sigue el calcio con un promedio de $12,11 \text{ cmol kg}^{-1}$ y también con alta variabilidad (CV = 120,28 %). El magnesio ($3,15 \text{ cmol kg}^{-1}$) y el potasio ($0,99 \text{ cmol kg}^{-1}$) muestran niveles promedios adecuados, aunque presentan distribución irregular a lo largo del área estudiada.

En conjunto, los suelos de este predio se caracterizan por una textura predominantemente arenosa, bajo contenido de materia orgánica y nitrógeno, pH neutro a ligeramente alcalino y presencia de salinidad y sodicidad en áreas puntuales. Estas condiciones sugieren la necesidad de un manejo diferenciado por ambientes, enfocado en mejorar la retención de humedad, incorporar materia orgánica de forma sostenida y controlar la salinidad mediante drenaje y manejo del riego, especialmente en zonas con alta concentración de sodio.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
pH	und	7,08	0,36	5,05	7,00	6,30	8,30	0,58
CEe	dS/m	4,15	6,28	151,32	2,25	0,20	28,80	2,71
CaCO ₃	%	0,69	0,21	30,36	0,66	0,24	1,40	0,91
MO	%	0,34	0,22	63,47	0,30	0,00	1,40	2,09
P disp.	mg/kg	122,11	172,96	141,65	19,56	1,38	1062,09	3,08
K disp.	mg/kg	260,37	172,88	66,40	197,96	59,58	935,81	1,81
N total	%	0,02	0,01	50,00	0,02	0,00	0,07	2,16
Arena	%	83,48	11,74	14,06	86,23	11,00	92,41	-4,57
Limo	%	11,64	11,02	94,71	9,46	4,58	82,83	5,18
Arcilla	%	4,88	2,37	48,62	4,31	2,42	14,39	1,93
Ca ²⁺	cmol/kg	12,11	14,57	120,28	8,28	1,34	98,77	4,23
K ⁺	cmol/kg	0,99	0,78	79,27	0,73	0,24	4,79	2,96
Mg ²⁺	cmol/kg	3,15	5,29	167,94	1,51	0,49	29,93	3,47
Na ⁺	cmol/kg	12,57	20,95	166,67	5,21	0,52	108,23	3,31
CICe	cmol/kg	28,82	38,22	132,61	16,89	5,78	188,26	3,02
PSI	%	37,55	15,96	42,51	37,85	2,81	65,74	0,05
PCI	%	47,90	15,33	32,01	47,99	19,61	81,94	0,13
PPI	%	4,86	2,13	43,70	5,16	1,41	9,08	0,12
PMI	%	9,68	3,20	33,09	8,93	3,86	17,08	0,43

SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, *Skewness*: coeficiente de asimetría, CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, N total: nitrógeno total, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, CICe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PAI: porcentaje de aluminio intercambiable

3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo

Este protocolo está diseñado para ser aplicado en el análisis espacial de cualquier propiedad del suelo (materia orgánica, pH, textura, etc.), siempre que se cuente con datos georreferenciados confiables. Una muestra confiable se caracteriza por tener precisión geográfica, ser representativa del área de estudio, presentar calidad en las mediciones y la minimización de errores.

Requisitos previos para el mapeo:

- Computador:** QGIS instalado (versión recomendada: 3,28 o superior).
- Complemento:** *Smart-Map* instalado y configurado.
- Base de datos:** *shapefile* de los puntos de muestreo del suelo con información georreferenciada y valores de la variable a analizar.

- d. **Unidades y proyección:** las capas de entrada (puntos georreferenciados y contorno del área de estudio) deben estar en el sistema métrico *Universal Transversal Mercator* (UTM), cuyas unidades son metros.

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, *shapefile*, u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (ej. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de los datos:** realizar un análisis exploratorio de los datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular medidas de tendencia central, como la media y la mediana, y evaluar la dispersión mediante la desviación estándar. Asimismo, emplear diagramas de caja para identificar patrones y detectar posibles valores atípicos.
- c. **Carga en QGIS:** importar los datos georreferenciados como una capa vectorial en QGIS y confirmar que la proyección de la capa sea coherente con la zona de estudio.

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

Procedimiento:

- 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 (H₀) 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 H₀, 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:

- 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.

- 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. Resultado del análisis geoestadístico de las propiedades físico-químicas del suelo

La caracterización geoestadística de las propiedades físicoquímicas del suelo en la EEA Tacna del INIA permitió identificar distintos grados de dependencia espacial entre las variables analizadas, reflejando patrones de organización heterogéneos y diferenciados dentro del área de estudio. Los modelos de ajuste incluyeron funciones esféricas y lineales, con rangos de influencia que variaron entre 238 y 861 m, lo que evidencia desde comportamientos medianamente estructurados hasta distribuciones dominadas por variabilidad local.

Las variables con mayor consistencia espacial fueron la conductividad eléctrica (CE), el calcio intercambiable (Ca^{2+}) y el carbonato de calcio (CaCO_3), las cuales mostraron una predictibilidad espacial moderada con coeficientes de determinación entre 0,21 y 0,37. La conductividad eléctrica, modelada mediante una función lineal con un rango de 479 m y un R^2 de 0,37, presentó la mayor estructuración espacial del conjunto, evidenciando patrones relacionados con la distribución de sales solubles y la dinámica hídrica del área. De forma similar, el calcio intercambiable mostró un comportamiento estructurado bajo un modelo lineal ($R^2 = 0,26$; rango = 821 m), aunque con variaciones locales considerables atribuibles a la heterogeneidad del complejo de cambio. El carbonato de calcio, con un rango de 849 m y un R^2 de 0,21, evidenció una distribución espacial influenciada por el material parental y procesos de acumulación de carbonatos en el perfil.

En un nivel bajo de predictibilidad se ubicaron variables como el pH, el limo, el nitrógeno (N total), la materia orgánica (MO) y el potasio intercambiable (K^+). El limo se ajustó a un modelo esférico ($R^2 = 0,12$; rango = 239 m), lo que indica una textura con variaciones graduales pero baja continuidad espacial. El pH, modelado mediante una función lineal con umbral ($R^2 = 0,15$; rango = 550 m), mostró una estructura espacial incipiente, lo que sugiere cierta continuidad a escala regional, pero alta variabilidad local. La materia orgánica y el nitrógeno total presentaron modelos lineales con umbrales ($R^2 = 0,1$ para ambos), con rangos amplios (784 y 850 m, respectivamente), indicando una dependencia espacial débil con transiciones muy graduales entre zonas. El potasio intercambiable (K^+), con un modelo lineal ($R^2 = 0,11$; rango = 861 m), reflejó una continuidad espacial limitada y cambios graduales en la saturación de bases.

Los resultados revelan que los suelos de la EEA Tacna presentan una organización espacial predominantemente débil, con la mayoría de las propiedades analizadas mostrando valores de R^2 inferiores a 0,15, lo que indica una alta variabilidad local y baja predictibilidad espacial. Solo la conductividad eléctrica exhibe una estructura espacial moderadamente definida ($R^2 = 0,37$), mientras que atributos como el calcio intercambiable y el carbonato de calcio presentan dependencias espaciales incipientes ($R^2 = 0,21-0,26$). Las fracciones texturales, los nutrientes disponibles y la mayoría de los cationes intercambiables muestran estructuras espaciales prácticamente aleatorias,

lo que sugiere que factores locales, el manejo agronómico y la heterogeneidad del material parental ejercen mayor influencia que los procesos pedogenéticos regionales.

Estas diferencias indican que las propiedades relacionadas con sales y carbonatos tienden a tener una estructura espacial más estable que las físicas y nutricionales en esta zona árida. Si bien las herramientas geoestadísticas permiten generar mapas temáticos, la baja dependencia espacial observada en la mayoría de las variables sugiere la conveniencia de reforzar el diseño de muestreo, aumentar la densidad de puntos y complementar las interpolaciones con análisis multivariados y validación de campo, a fin de mejorar la precisión y confiabilidad de los mapas generados para el manejo sitio-específico de la fertilidad del suelo en el área de estudio.

Tabla 4. Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo de la EEA Tacna

Variable	Modelo	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Spherical</i>	28,11	33,62	580	6,23	0,01
Limo	<i>Spherical</i>	14,96	20,99	238,52	5,03	0,12
Arcilla	<i>Linear</i>	2,08	3,37	610,15	1,85	0,01
pH	<i>Linear to Sill</i>	0,06	0,11	550,08	0,29	0,15
CE	<i>Linear to Sill</i>	3,96	11,58	478,52	2,49	0,37
MO	<i>Linear to Sill</i>	0,03	0,03	784,26	0,17	0,1
N total	<i>Linear to Sill</i>	0	0	849,89	0,01	0,1
P disp.	<i>Linear to Sill</i>	5248,74	12 525,4	612,1	110,74	0,07
K disp.	<i>Linear</i>	5849,45	12 762,43	414,91	134,09	0,04
CaCO ₃	<i>Linear to Sill</i>	0,02	0,04	849,34	0,17	0,21
Ca ²⁺	<i>Linear to Sill</i>	37,83	76,81	821,42	6,95	0,26
Mg ²⁺	<i>Linear</i>	7,75	8,41	807,99	2,72	0,07
Na ⁺	<i>Linear</i>	78,67	131,15	829,82	10,72	0,01
K ⁺	<i>Linear</i>	0,16	0,21	860,72	0,42	0,11
CICe	<i>Gaussian</i>	1,08	1,50	193,45	1,09	0,30
PSI	<i>Spherical</i>	0,47	0,61	863,04	1,67	0,13
PCI	<i>Spherical</i>	0,45	0,72	866,29	0,76	0,36
PPI	<i>Gaussian</i>	0,32	0,34	1195,05	0,57	0,37
PMI	<i>Spherical</i>	6,80	10,86	334,35	0,39	0,50
BD	<i>Gaussian</i>	1,33	1,36	193,78	1,14	0,29

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

3.9. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas obtenidos para la EEA Tacna (Figura 9-26) reflejan una distribución espacial predominantemente irregular en las propiedades edáficas evaluadas, con baja a moderada predictibilidad geoestadística para la mayoría de las variables. Esto responde a la marcada heterogeneidad del suelo en condiciones áridas, donde factores locales como el manejo agronómico, la variabilidad textural y la salinización ejercen mayor influencia que los procesos pedogenéticos regionales. Pese a esta variabilidad, los mapas generados permiten identificar patrones relevantes que orientan la zonificación del campo y el manejo diferenciado de la fertilidad.

La textura del suelo muestra una distribución fragmentada, con predominio de suelos arenoso-franco en la mayor parte del predio y sectores puntuales de mayor contenido de arcilla o limo. Aunque la continuidad espacial de las fracciones texturales es limitada, se observan zonas relativamente homogéneas que condicionan la capacidad de retención hídrica y la dinámica de nutrientes. En los sectores más arenosos será necesario realizar aplicaciones más frecuentes de fertilizantes debido a la menor retención, mientras que en las áreas con mayor contenido de arcilla se puede aprovechar mejor la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

El pH presenta una distribución espacial incipiente, con valores que oscilan principalmente entre ligeramente ácidos a neutros, y ligeras tendencias alcalinas en ciertas zonas. Aunque la variabilidad local es considerable, el patrón observado sugiere sectores relativamente estables desde el punto de vista químico, donde la disponibilidad de nutrientes puede optimizarse mediante enmiendas específicas. En las zonas con pH más elevado es importante monitorear la disponibilidad de micronutrientes como hierro y zinc, que pueden verse limitados en condiciones alcalinas.

La conductividad eléctrica (CE) exhibe el gradiente espacial más consistente de todas las variables analizadas, con zonas claramente diferenciadas de mayor acumulación salina. Este patrón es de particular interés para el manejo del riego y la selección de cultivos tolerantes a salinidad en los sectores más afectados. La distribución de la CE permite delimitar áreas donde es prioritario implementar prácticas de lavado de sales o ajustar la frecuencia y calidad del agua de riego para evitar el deterioro progresivo del suelo.

La materia orgánica (MO) y el nitrógeno (N total) muestran distribuciones espaciales débiles, con variaciones graduales a lo largo del predio. Aunque su continuidad espacial es limitada, se identifican zonas con mayor contenido orgánico, probablemente asociadas al historial de aplicaciones de enmiendas o residuos de cosecha. Estos sectores presentan mejor fertilidad natural y mayor capacidad de retención de nutrientes y agua, lo que puede aprovecharse para optimizar las dosis de fertilización nitrogenada.

En cuanto a los nutrientes disponibles, tanto el fósforo (P disp.) como el potasio (K disp.), presentan estructuras espaciales prácticamente aleatorias, reflejando la fuerte influencia del manejo localizado y la baja movilidad de estos elementos en el suelo. Esta variabilidad dificulta la zonificación precisa, aunque los mapas permiten identificar áreas con mayores deficiencias donde priorizar las aplicaciones. El potasio disponible, en particular, muestra sectores de baja concentración que requieren atención para evitar limitaciones en el desarrollo de los cultivos.

El calcio intercambiable (Ca^{2+}) y el carbonato de calcio (CaCO_3) presentan gradientes espaciales moderados, con una distribución relativamente amplia del calcio y mayor irregularidad en los carbonatos. El calcio muestra zonas de buena saturación que refuerzan la estabilidad estructural del suelo, mientras que el CaCO_3 varía de forma menos predecible, lo que sugiere diferencias en el material parental o procesos de acumulación localizada. Estas variables pueden utilizarse

juntamente con el pH para definir áreas con mayor capacidad de taponamiento y menor necesidad de enmiendas calcáreas.

El magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) intercambiables exhiben baja dependencia espacial, con distribuciones mayormente irregulares que reflejan la heterogeneidad del complejo de cambio en condiciones áridas. Aunque su predictibilidad espacial es limitada, los mapas generados ofrecen información útil para identificar zonas con desbalances catiónicos o riesgo de sodificación, aspectos relevantes para el manejo de la fertilidad en el largo plazo.

En conjunto, los mapas edáficos de la EEA Tacna evidencian una organización espacial compleja, donde solo algunas variables (CE, Ca^{2+} , $CaCO_3$) presentan estructuras suficientemente definidas para sustentar zonificaciones agronómicas. La mayoría de las propiedades muestra alta variabilidad local, lo que plantea la necesidad de complementar el análisis geoestadístico con muestreos más densos y evaluaciones de campo para mejorar la representatividad de los mapas. Pese a estas limitaciones, la información generada constituye un avance importante hacia la caracterización espacial del suelo en condiciones áridas y sienta las bases para la implementación gradual de estrategias de agricultura de precisión en la zona.

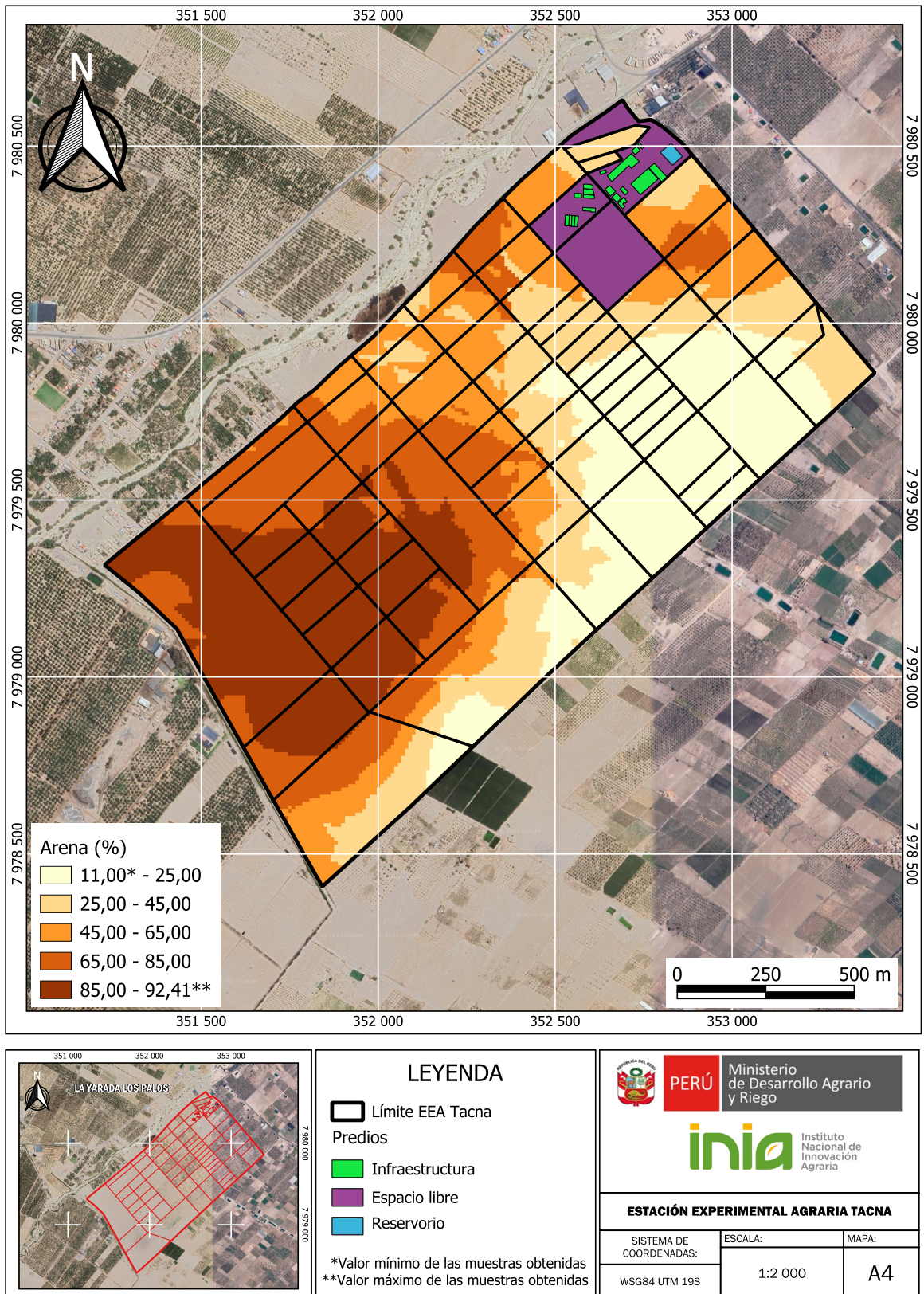


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

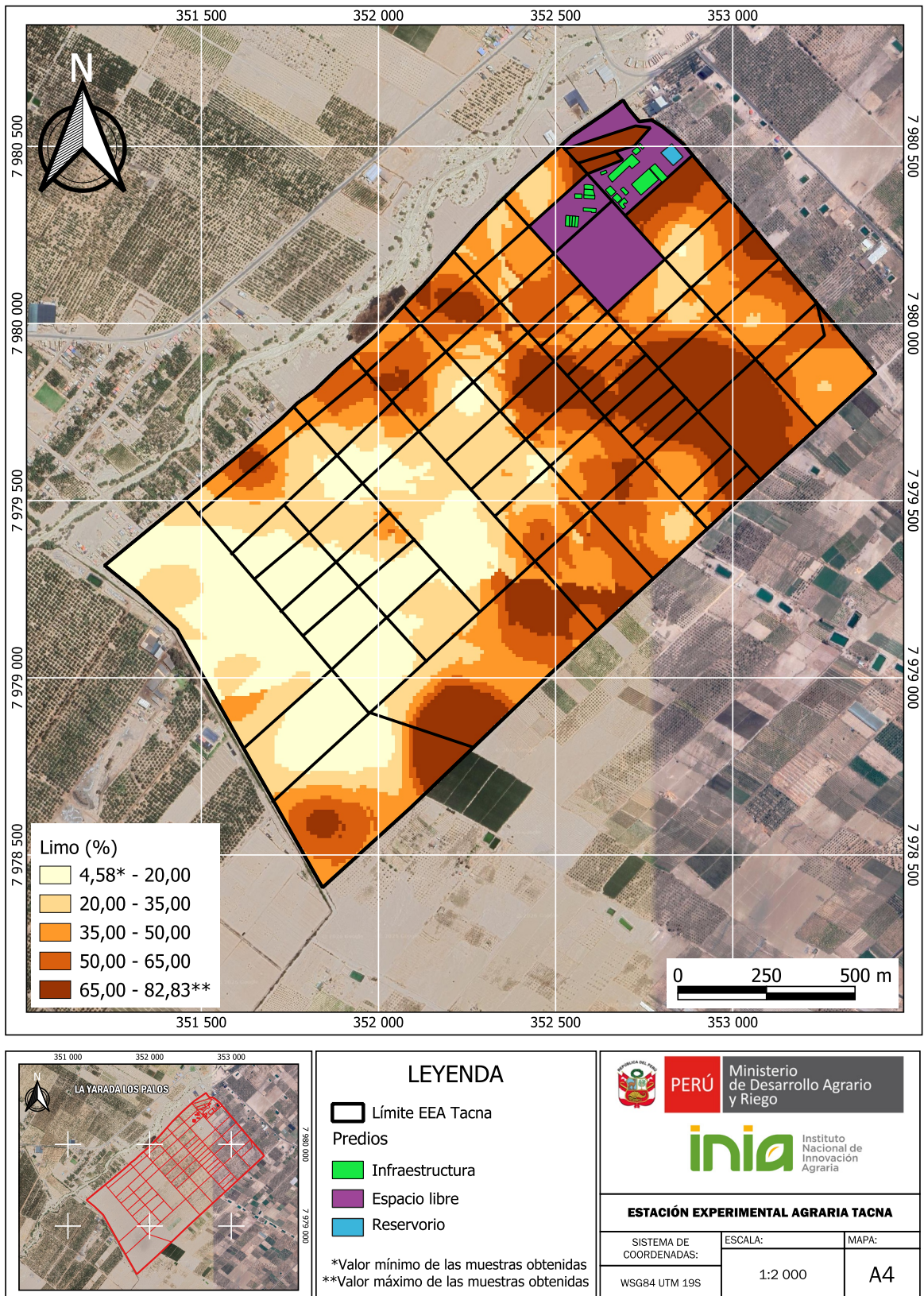


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

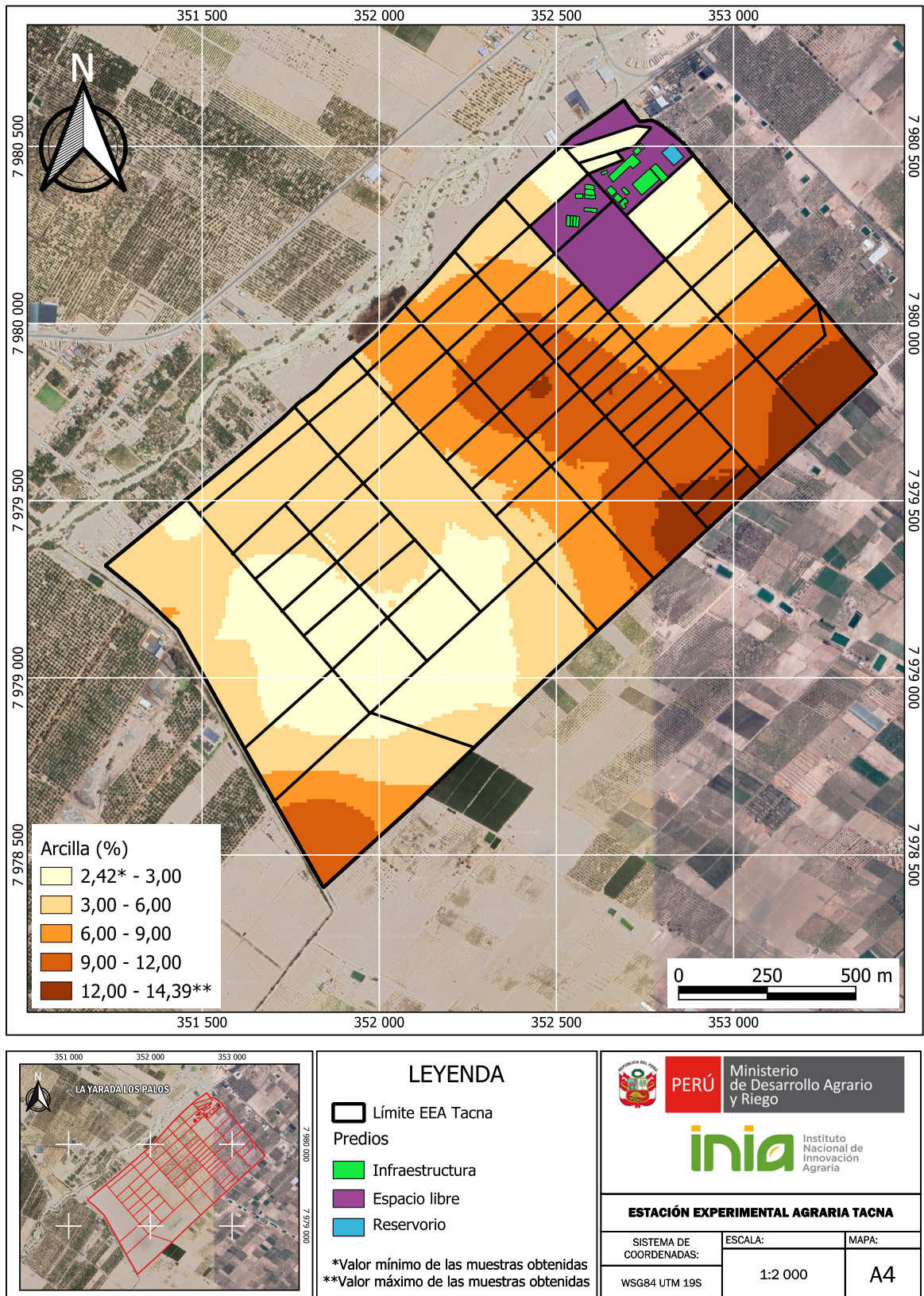


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

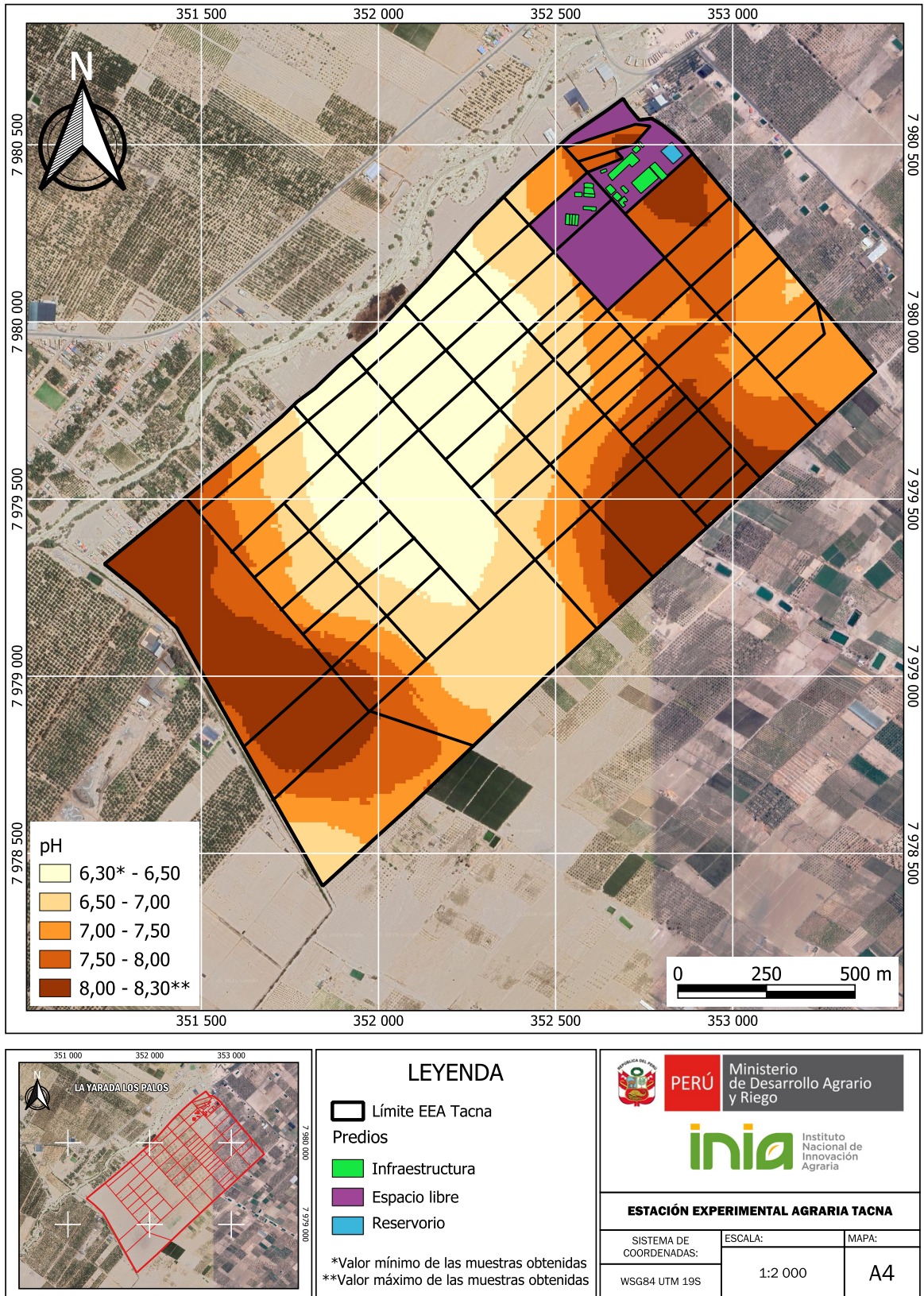


Figura 12. Mapa de variación espacial del pH

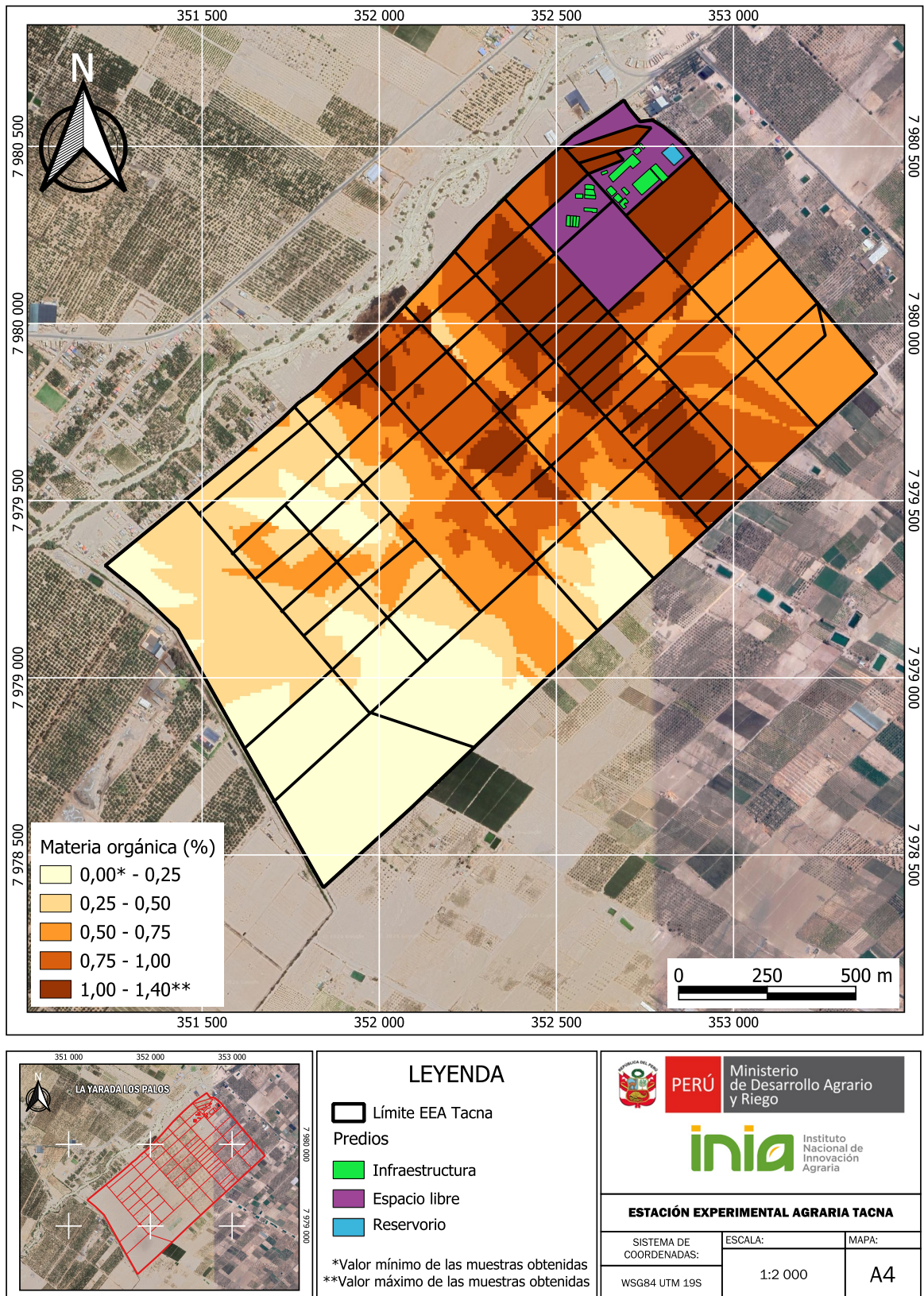


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

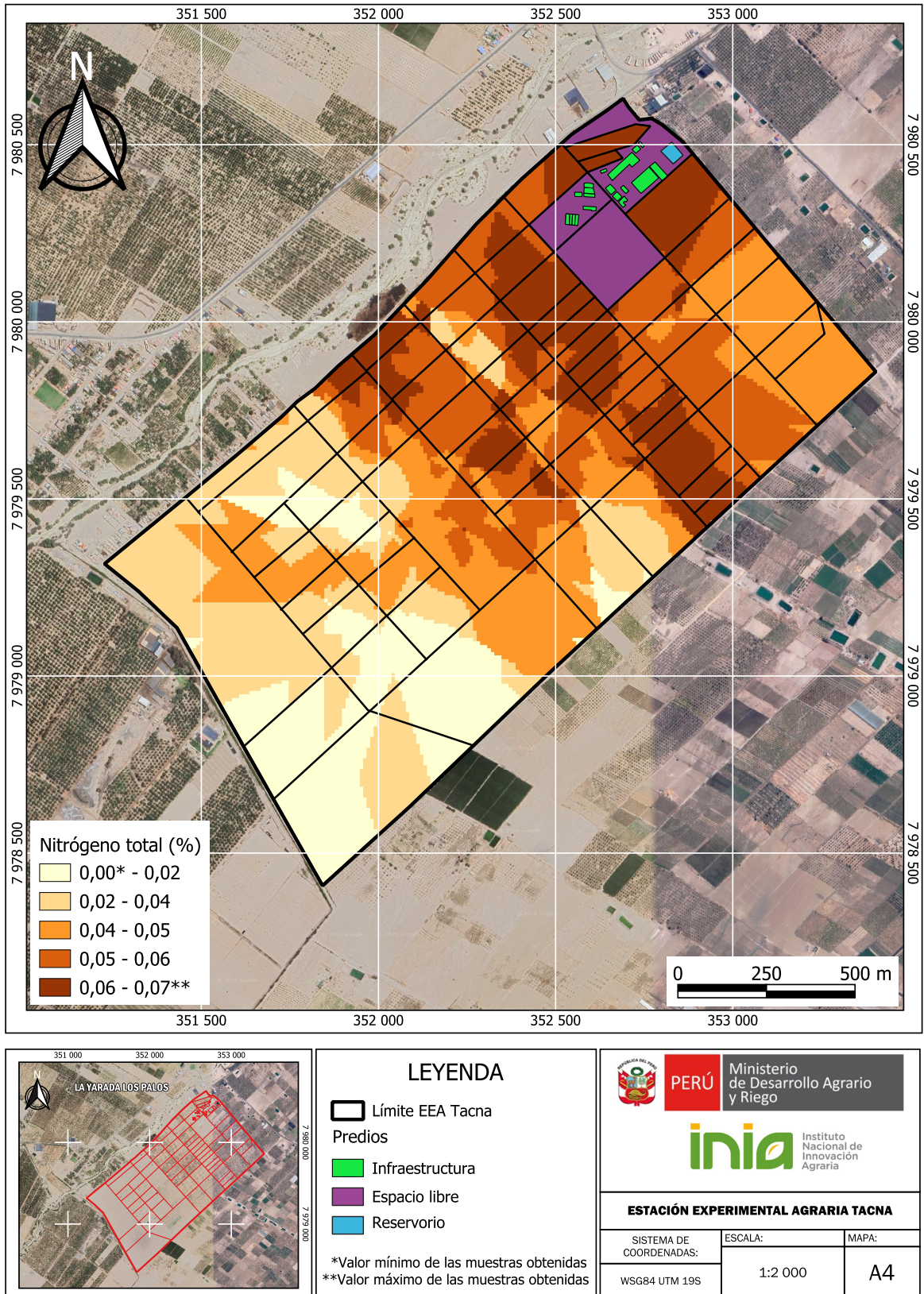


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje nitrógeno total

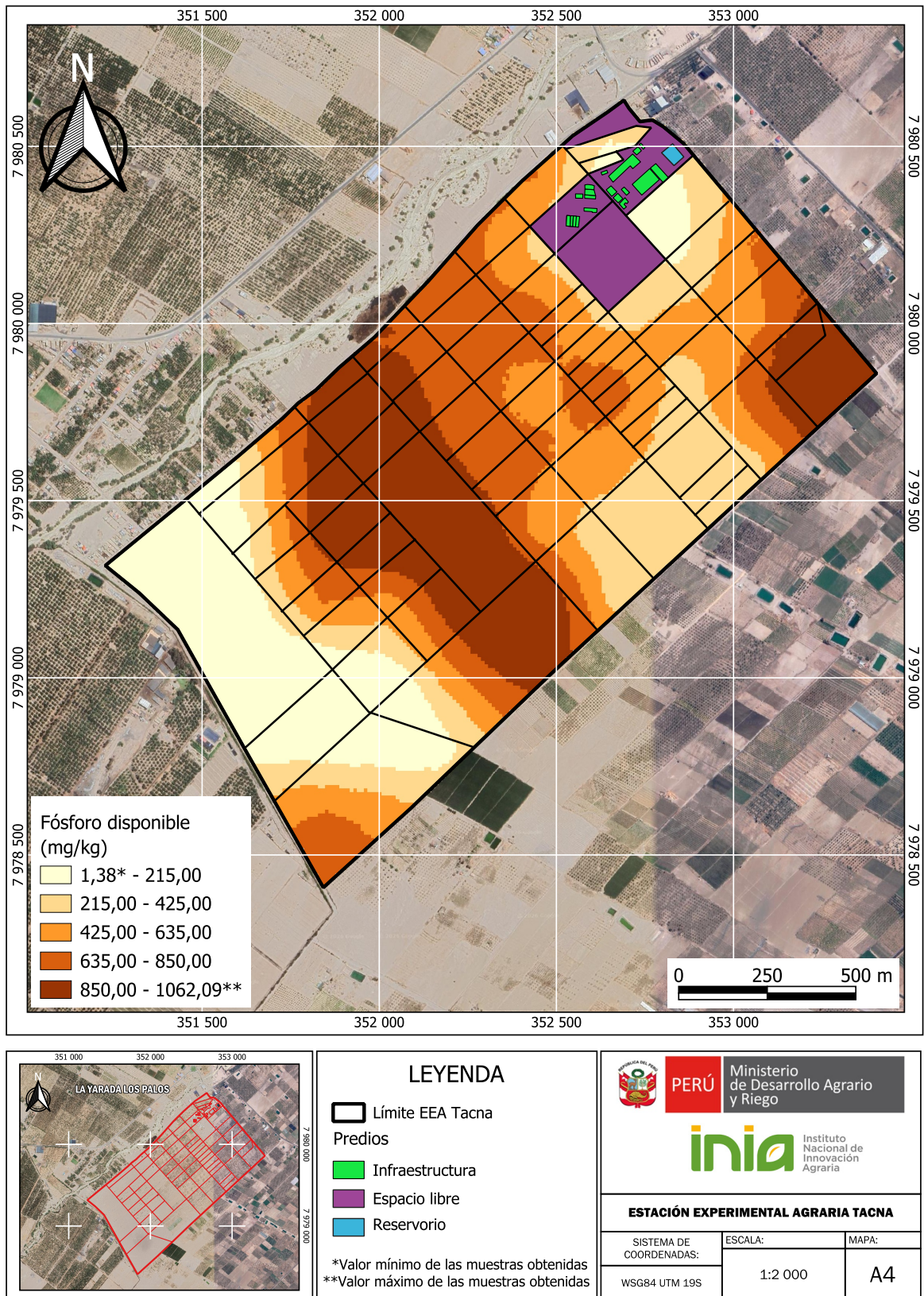


Figura 15. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

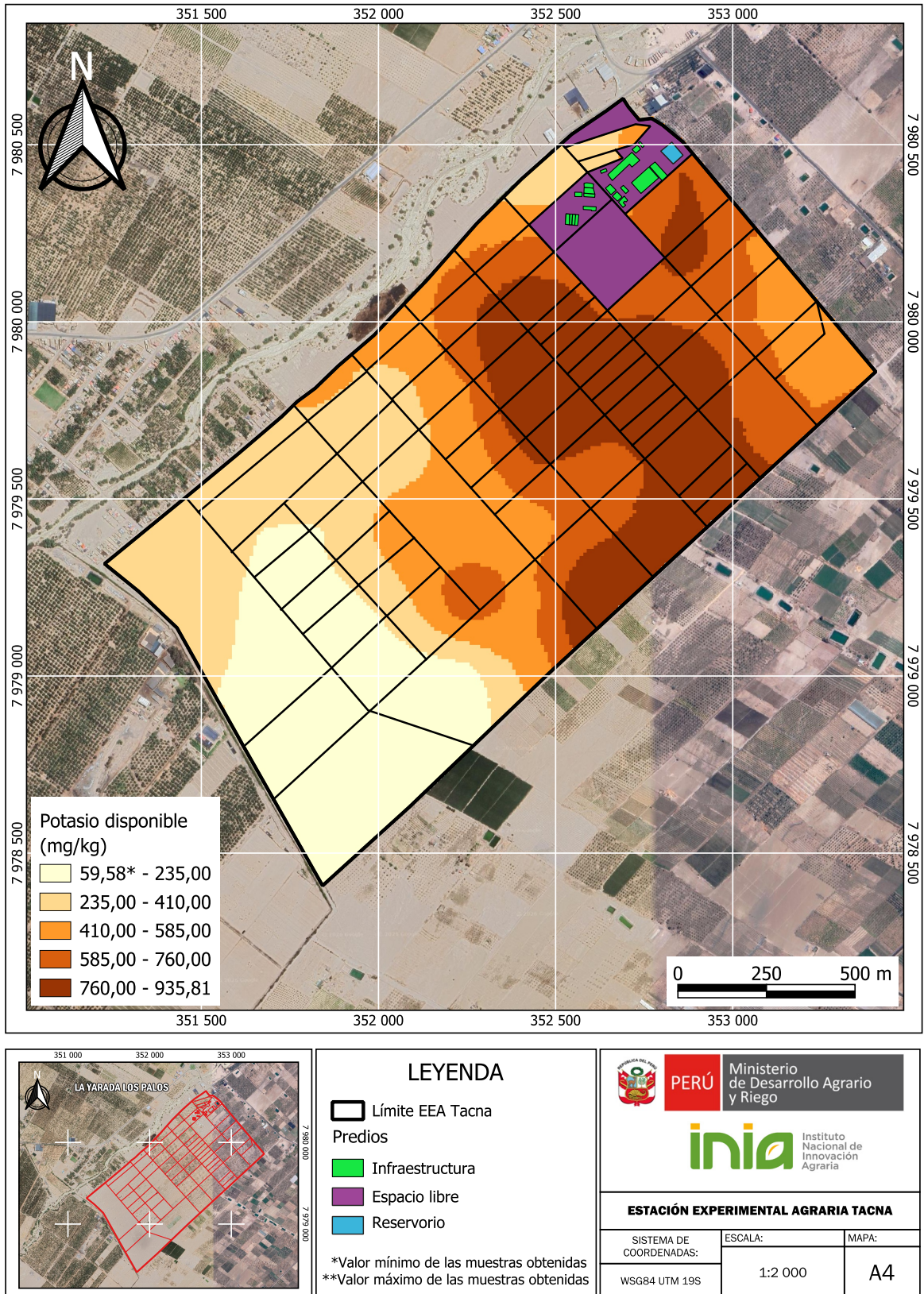


Figura 16. Mapa de variación espacial del potasio disponible

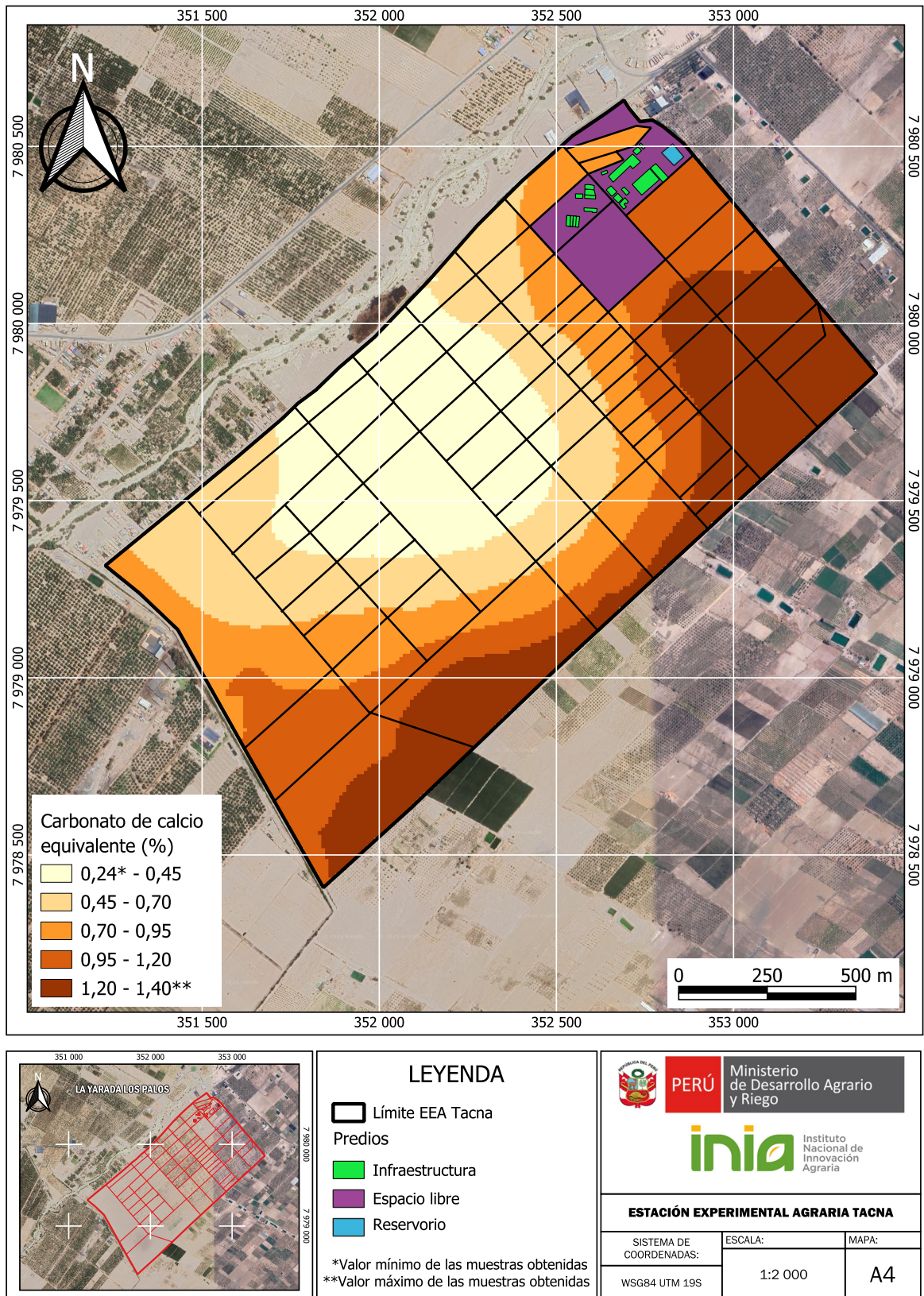


Figura 17. Mapa de variación espacial de carbonato de calcio equivalente

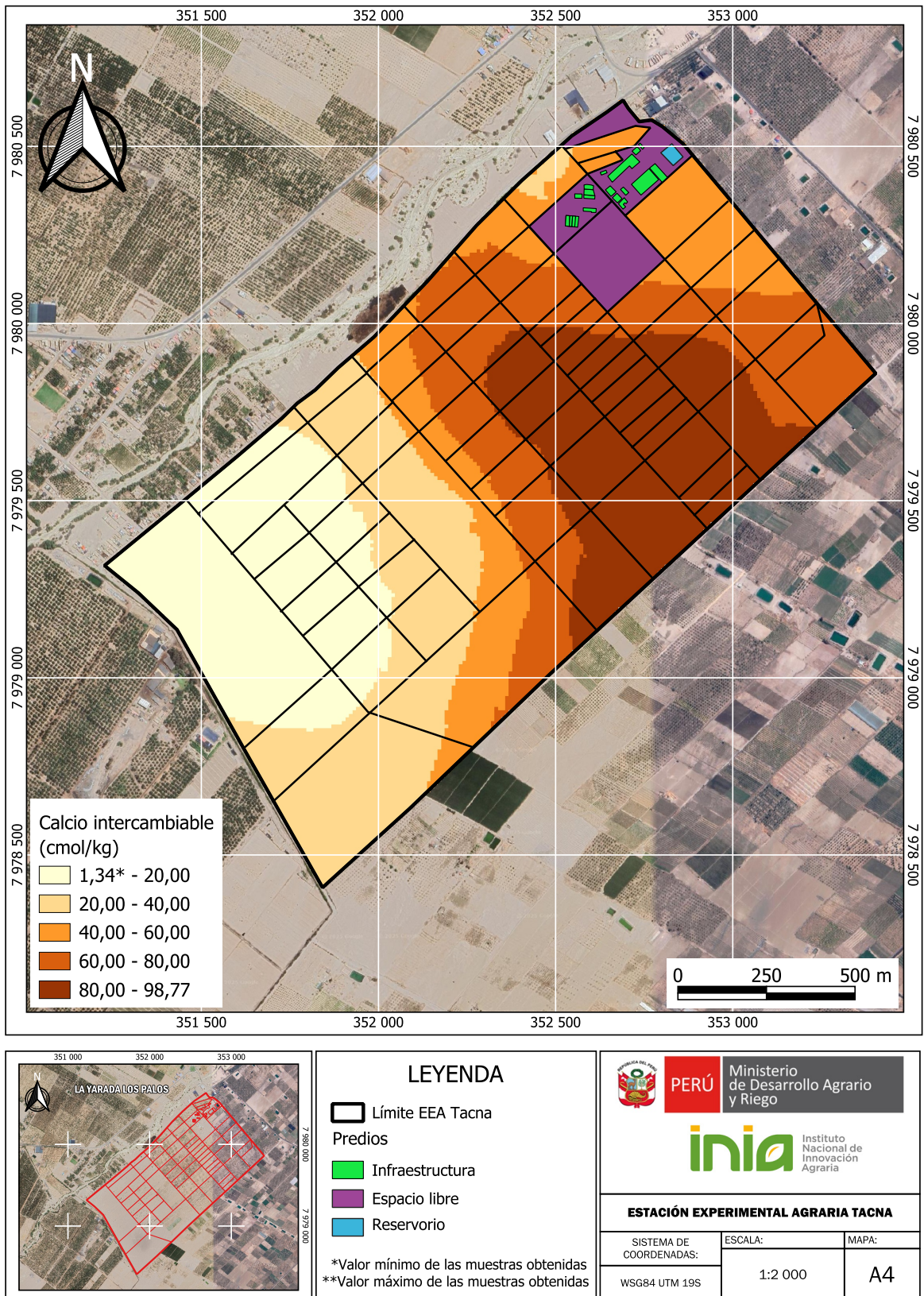


Figura 18. Mapa de variación espacial del calcio intercambiable

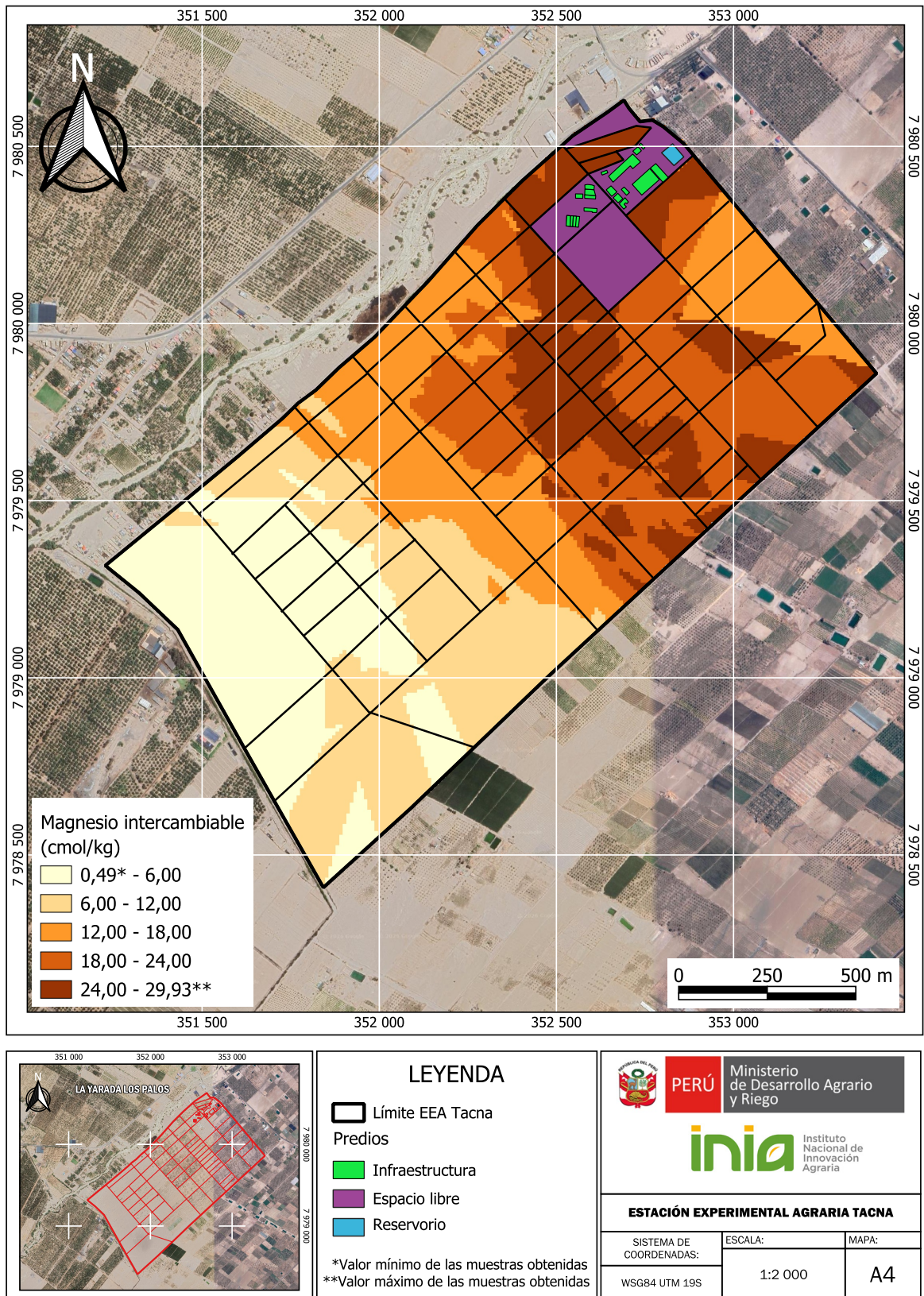


Figura 19. Mapa de variación espacial del magnesio intercambiable

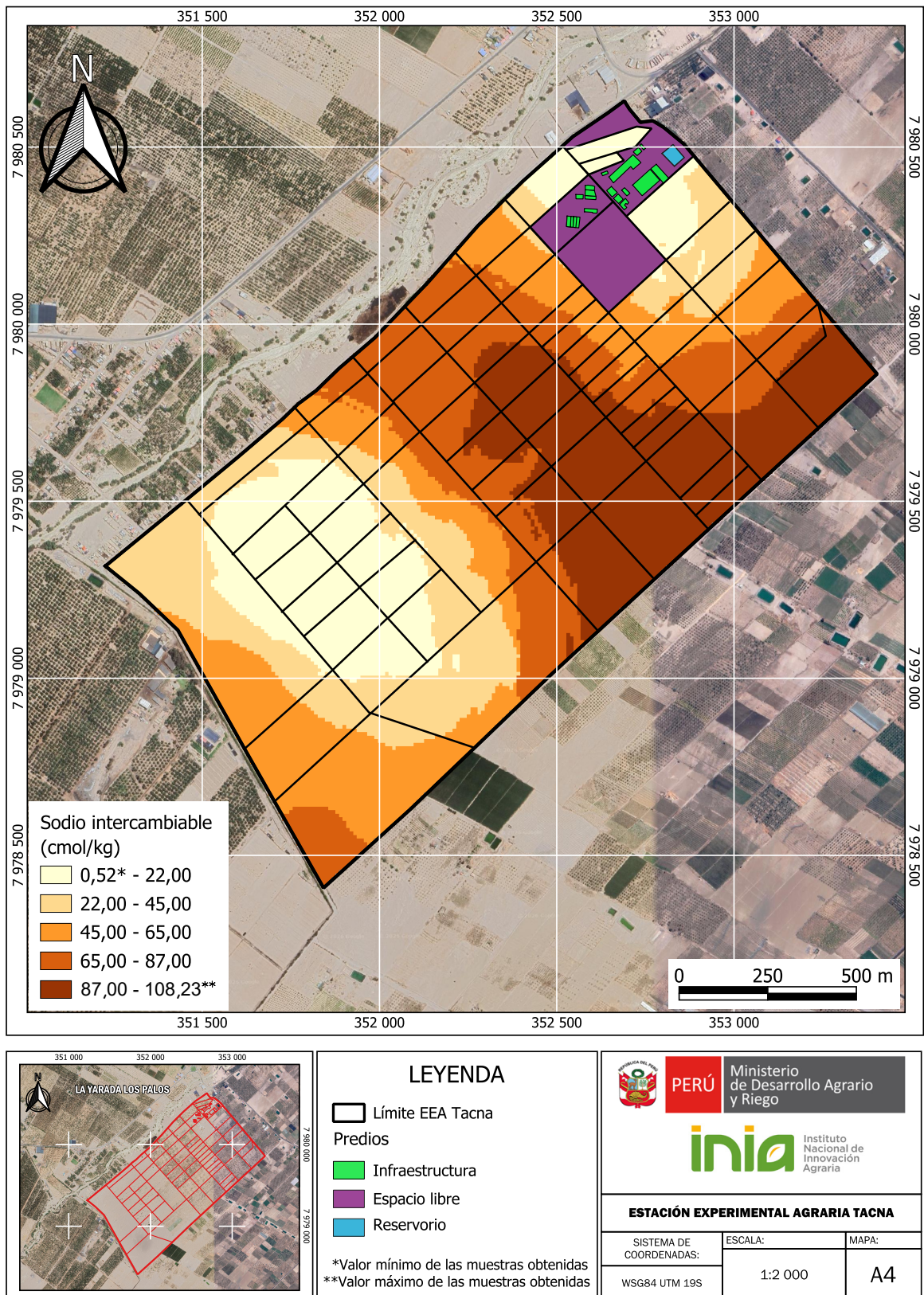


Figura 20. Mapa de variación espacial del sodio intercambiable

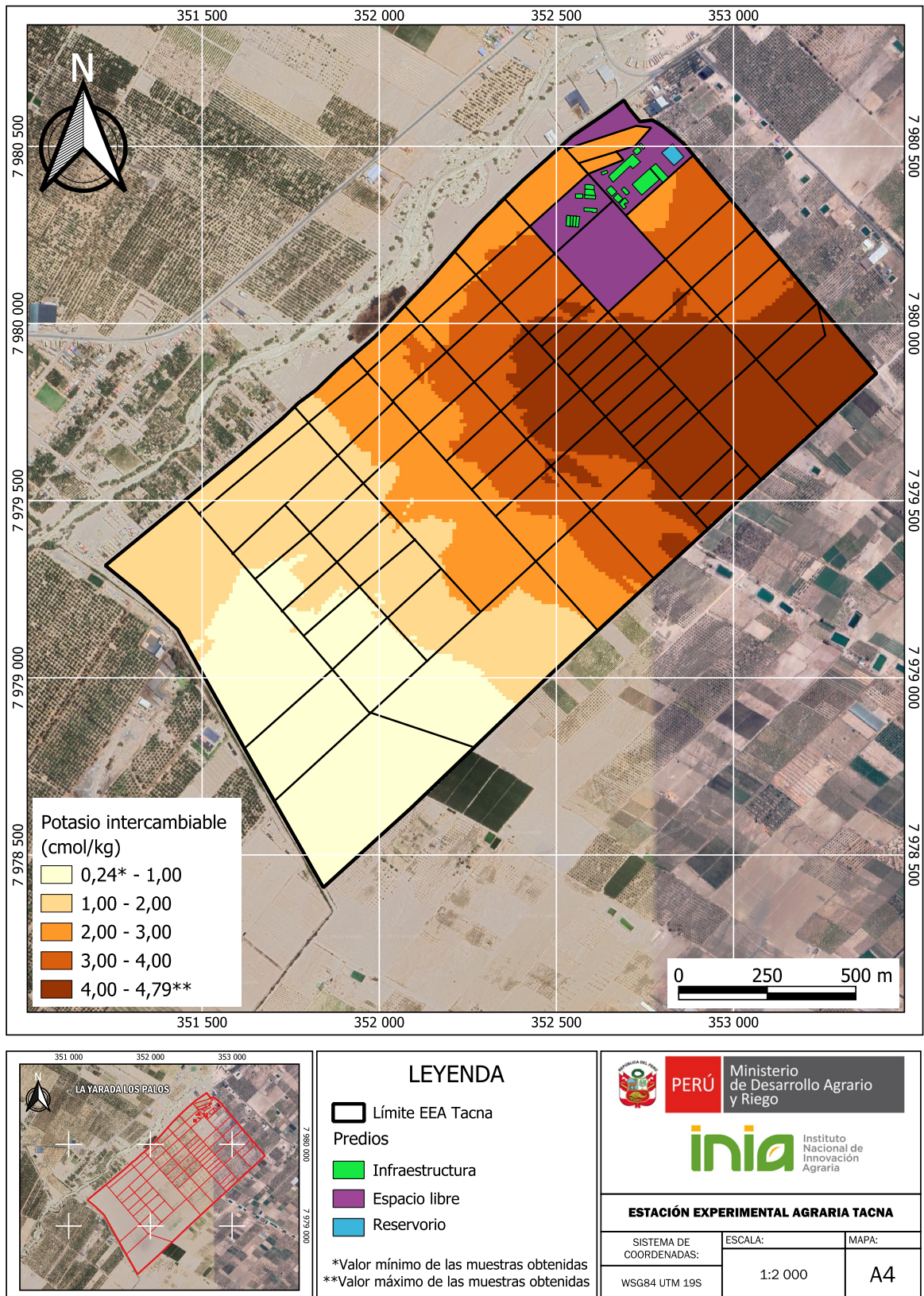


Figura 21. Mapa de variación espacial del potasio intercambiable

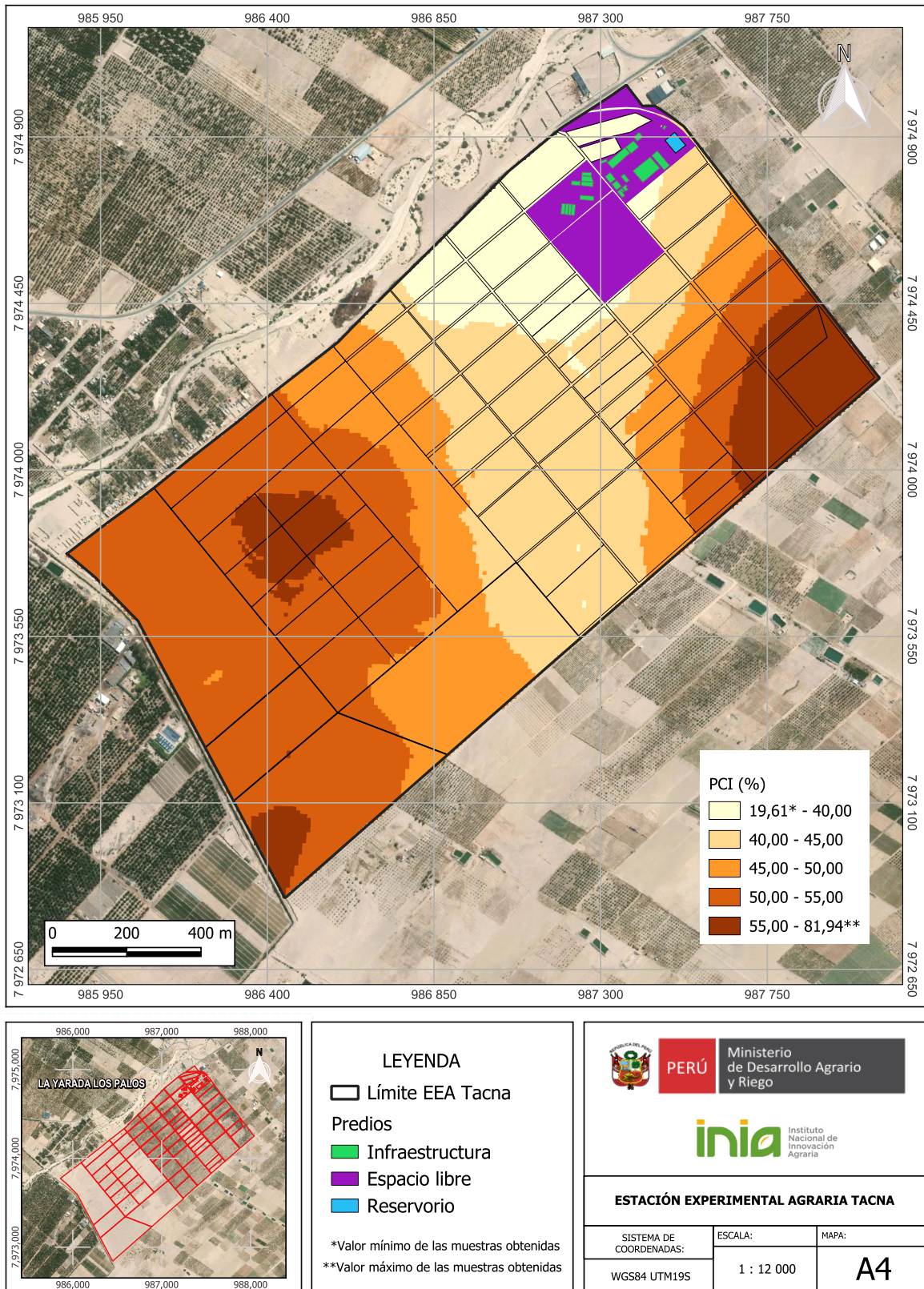


Figura 22. Mapa de variación espacial del porcentaje de calcio intercambiable

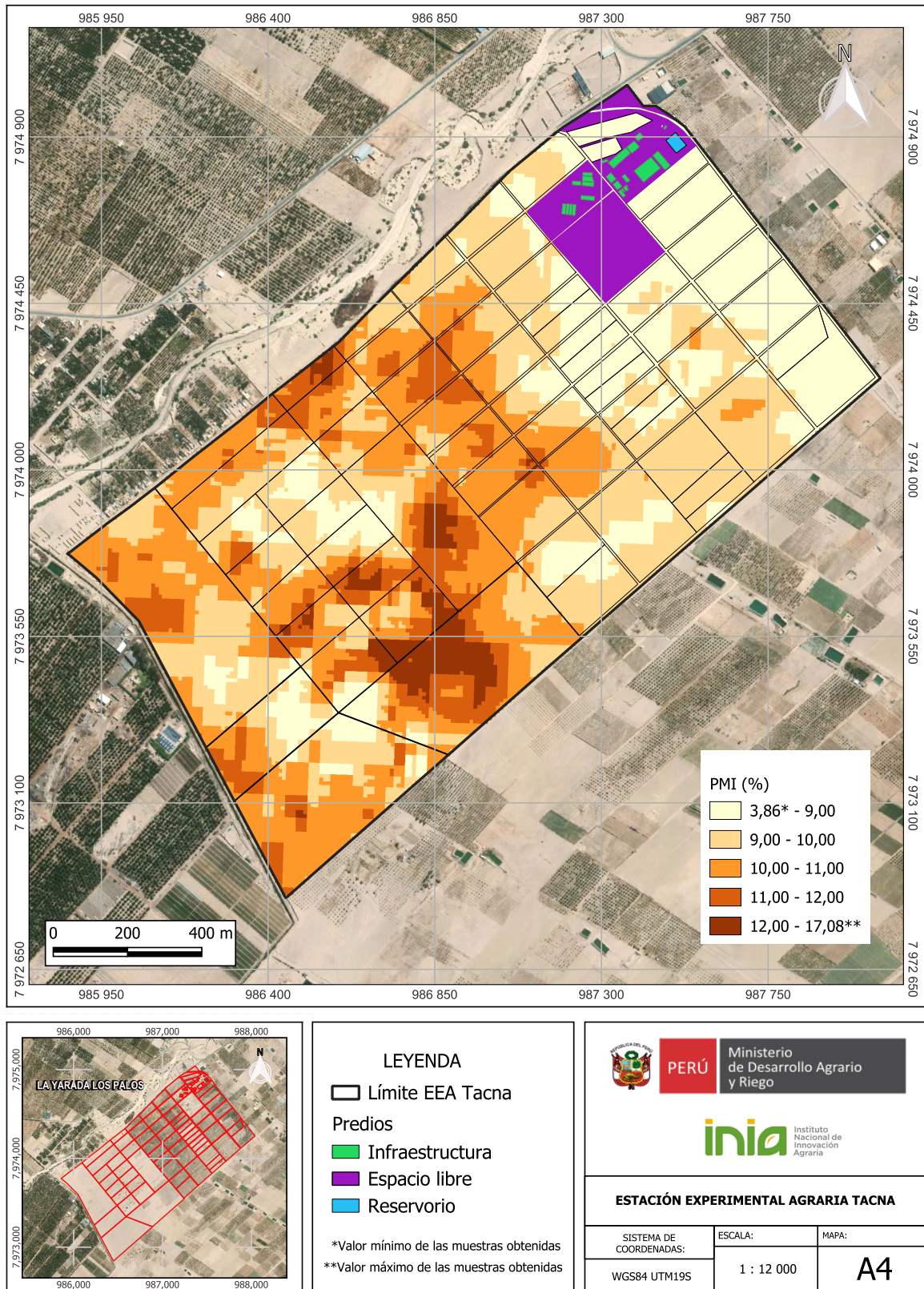


Figura 23. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable

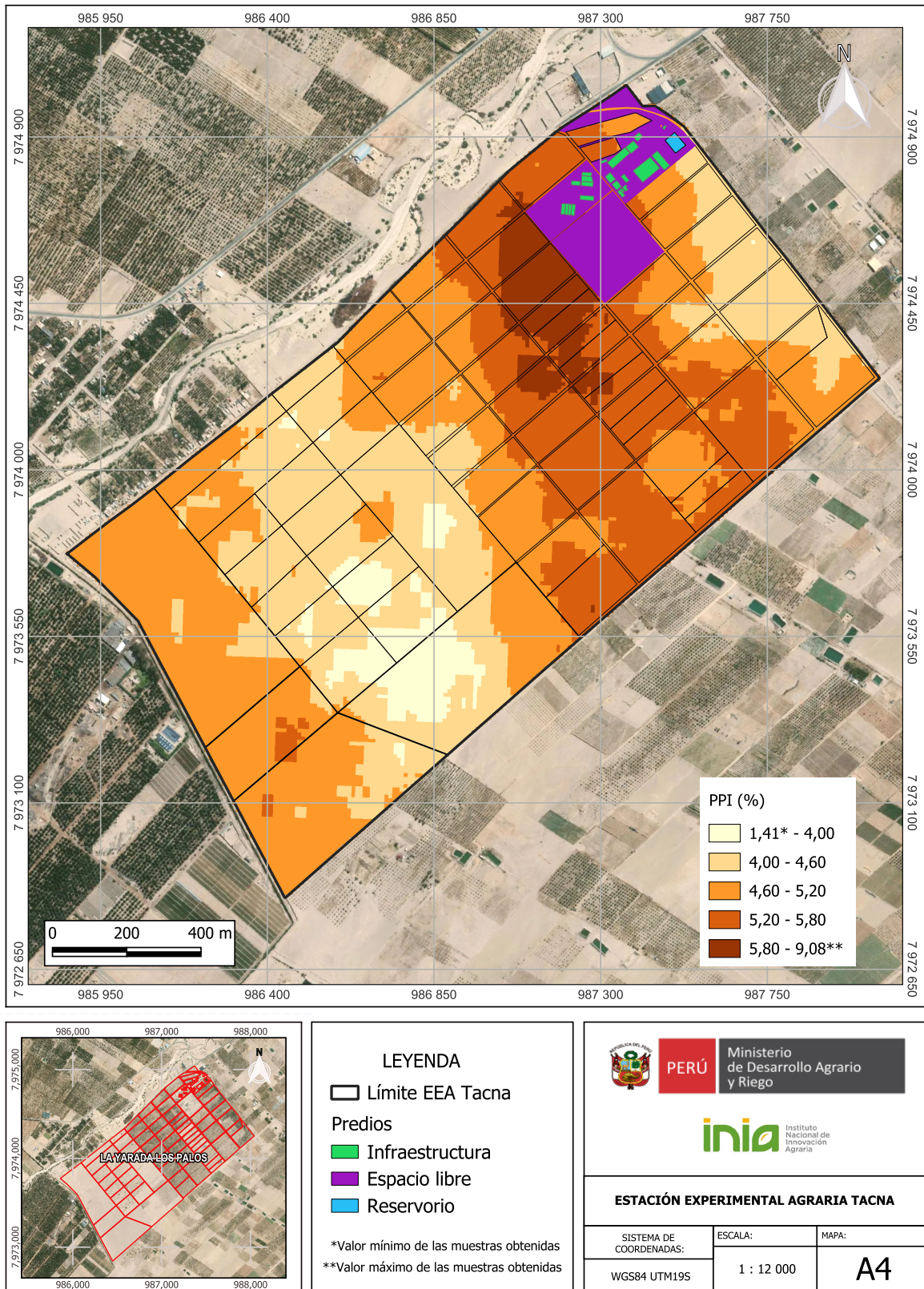


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de potasio intercambiable

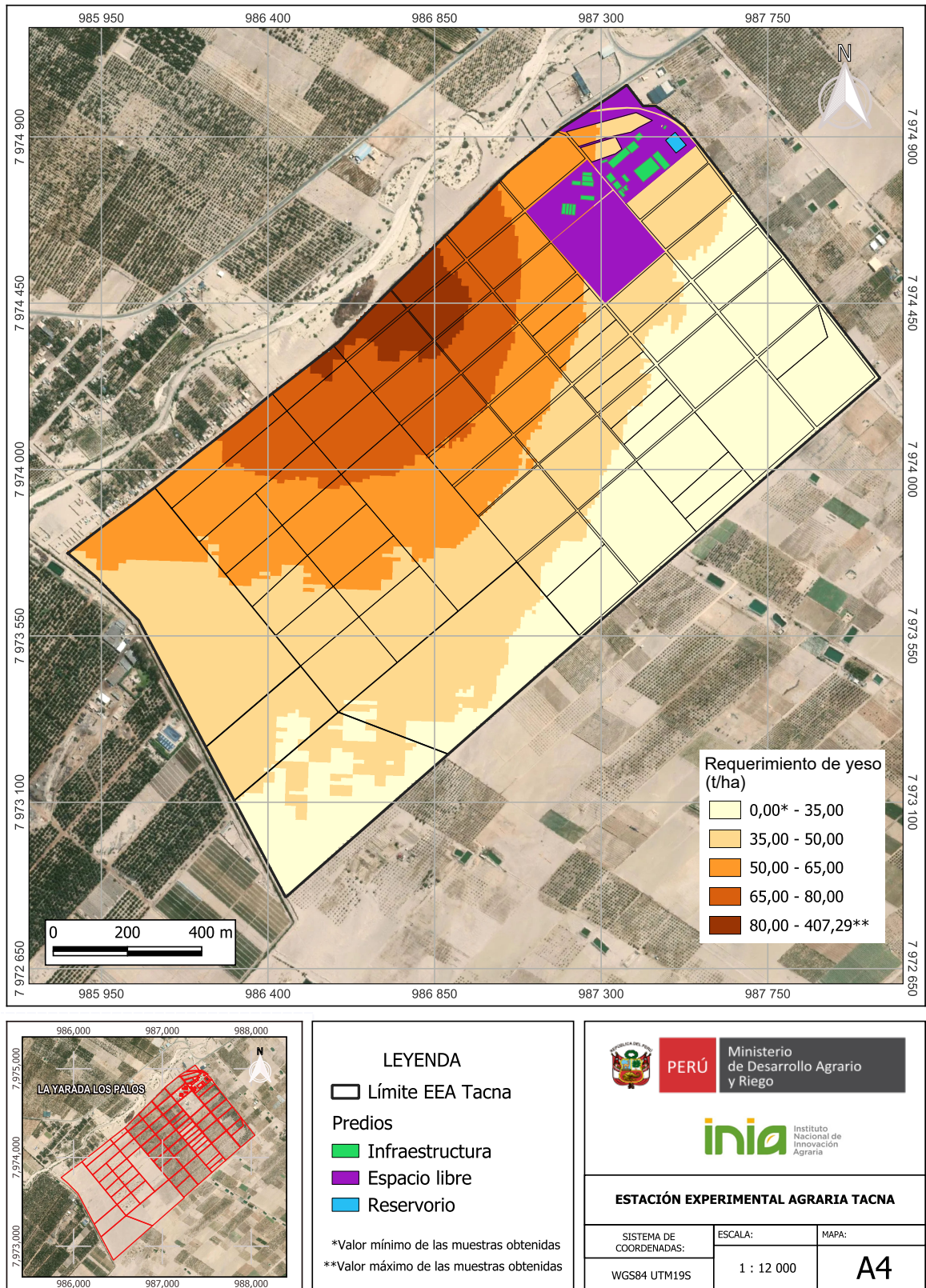


Figura 25. Mapa de variación espacial del requerimiento de yeso

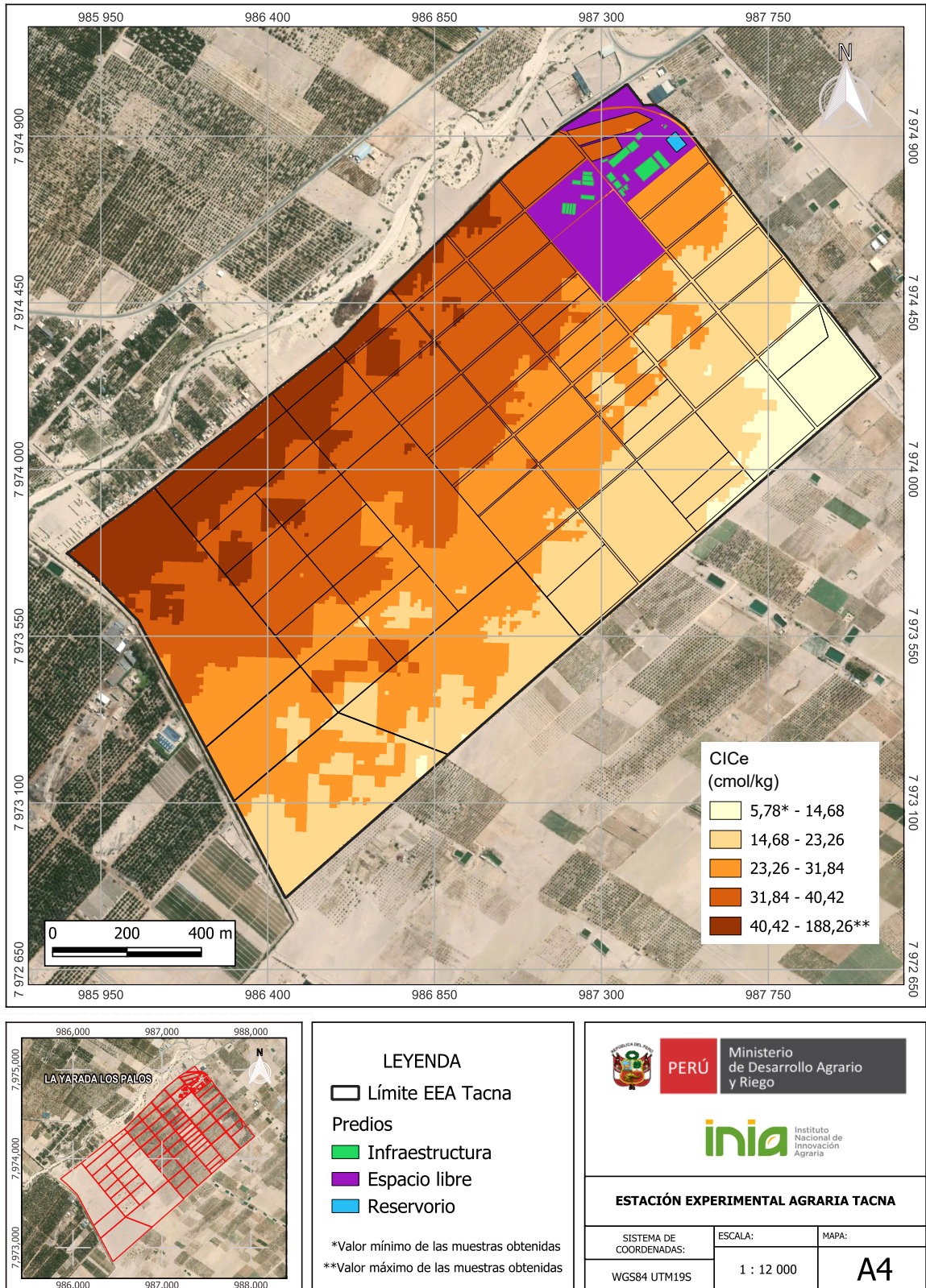


Figura 26. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva



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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial de las relaciones catiónicas en suelos salino-sódicos

Desde la perspectiva edafológica del modelo BCSR, el equilibrio relativo entre los cationes básicos en el complejo de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) es un determinante clave para la nutrición vegetal y la fertilidad química del suelo.

En los suelos de la EEA Tacna, el pH ($7,08 \pm 0,36$), la CE ($4,15 \pm 6,8 \text{ dS m}^{-1}$) y el PSI ($37,55 \pm 15,96 \%$) evidenciaron desequilibrios catiónicos severos, asociados a una alta saturación de sodio extractable. De acuerdo con la clasificación de Rengasamy (2010), resumida en la Tabla 6, se diagnostica la presencia predominante de suelos neutros salinos-sódicos, donde los cultivos se encuentran bajo condiciones de estrés osmótico y toxicidad iónica por Na^+ y Cl^- .

Tabla 6. Clasificación química de los suelos agrícolas en función del pH, conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable

Clase	Tipo de suelo	pH	CE	PSI	Características principales
0	Suelo no afectado por sales	6-8	< 4	< 6	Suelo normal y con limitaciones no relacionadas con salinidad o sodicidad
1	Suelo salino ácido	< 6	≥ 4	< 6	Estrés osmótico, toxicidad de micronutrientes (Fe, Al, Mn) y de aniones dominantes
2	Suelo salino neutro	6-8	≥ 4	< 6	Predomina el estrés osmótico y posible toxicidad del anión o catión predominante
3	Suelo salino alcalino	> 8	≥ 4	< 6	Estrés osmótico, toxicidad de HCO_3^- y CO_3^{2-} y toxicidad de micronutrientes a pH alto
4	Suelo salino-sódico ácido	< 6	≥ 4	≥ 6	Estrés osmótico, toxicidad por Na^+ y toxicidad de micronutrientes
5	Suelo salino-sódico neutro	6-8	≥ 4	≥ 6	Estrés osmótico, toxicidad por Na^+ y toxicidad del anión dominante (Cl^- o SO_4^{2-})
6	Suelo salino-sódico alcalino	> 8	≥ 4	≥ 6	Estrés osmótico, toxicidad de HCO_3^- y CO_3^{2-} y toxicidad de micronutrientes a pH alto
7	Suelo sódico ácido	< 6	< 4	≥ 6	Efectos indirectos por degradación de la estructura del suelo y encharcamiento estacional
8	Suelo sódico neutro	6-8	< 4	≥ 6	Problemas estructurales, infiltración reducida y posible toxicidad por Na^+
9	Suelo sódico alcalino	> 8	< 4	≥ 6	Degradación estructural severa, dispersión y toxicidad de HCO_3^- y CO_3^{2-}

Particularmente el Olivo (*Olea europaea* L.), una especie glicofítica que, aunque dispone de mecanismos de adaptación a la salinidad, estos resultan insuficientes para evitar completamente los efectos negativos sobre el metabolismo fotosintético (Chartzoulakis et al., 2006). De hecho, la tolerancia del olivo no implica ausencia de impacto, sino un equilibrio entre mecanismos de defensa y la reducción inevitable de la transpiración y la fotosíntesis cuando la CE supera los $4,82 \text{ dS m}^{-1}$ (Chartzoulakis et al., 2006). En Túnez, país de África, se observó reducciones en la tasa fotosintética de entre 34 y 51 % y en la conductancia estomática de entre 40 y 58 % en distintos cultivares de Olivo sometidos a estrés salino (Boussadia et al., 2023). Algunos autores sostienen que el umbral de tolerancia a la salinidad del olivo se encuentra entre 4 y 6 dS m^{-1} (Bernstein, 1965), en este contexto, es importante la implementación de técnicas agronómicas de mitigación del estrés salino.

Ante este escenario, se han propuesto diversas estrategias nutricionales para mitigar los efectos negativos de la salinidad en el olivo. Entre ellas destaca la fertilización potásica, dado que el potasio es el nutriente con mayor extracción por los frutos, y su deficiencia constituye uno de los problemas más frecuentes en condiciones salinas y sódicas (Connor y Fereres, 2005; Fernández-Escobar et al., 2006). Se ha reportado que el incremento de la relación de K^+/Na^+ radicular y foliar, estimula procesos de osmorregulación y aumenta tasa fotosintética de las hojas en el olivo (Boussadia et al., 2023). Por lo que, aunque con contenidos moderados de potasio disponible ($260,37 \pm 172,88 \text{ mg kg}^{-1}$) en el suelo, su fertilización en zonas con altos porcentajes de arena y bajos de materia orgánica tienen gran relevancia.

En el caso de los suelos de la EEA Tacna, a pesar de que presentan una media de PPI ($4,86 \pm 2,13 \%$; CV = 43,70 %), dentro del rango óptimo, existe alta variabilidad y zonas con niveles deficientes (percentil 25 = 2,79 %). Asimismo, el PPI presentó un moderado grado de ajuste en los valores predichos a nivel espacial ($R^2 = 0,37$), y se pudo identificar zonas de manejo en función al potasio extractable.

Por otro lado, el diagnóstico de las relaciones catiónicas muestra que el PCI ($47,90 \pm 15,33 \%$; CV = 32,01 %) y el PMI ($9,68 \pm 3,20 \%$; CV = 33,09 %), se encuentran en condiciones subóptimas que perjudican la salud del suelo, debilitando la estabilidad estructural y la actividad biológica. La moderada predictibilidad espacial de ambas variables ($R^2 = 0,36$ y 0,50, respectivamente), permitió identificar zonas de manejo con diferentes niveles de riesgo agronómico, aunque al parecer el problema es generalizado, ya que el 75 % de los suelos analizados presentan valores $< 59,96 \%$ de calcio extractable.

En el caso de la CE, los resultados mostraron una buena estructura y moderada predictibilidad espacial con un valor de R^2 de 0,37 (Tabla 3), lo cual indica un buen ajuste para el mapeo y permite aplicar estrategias de manejo sitio-específico, como la aplicación de yeso agrícola y la nutrición a base de K y Ca. En la Figura 27 se pudo identificar cinco zonas con diferente grado de peligro de salinidad: La zona 1 con bajo peligro de salinidad (CE: $0,20\text{-}6,00 \text{ dS m}^{-1}$), la zona 2 con moderado peligro de salinidad (CE: $6,00\text{-}11,50 \text{ dS m}^{-1}$), la zona 3 con alto peligro de salinidad (CE: $11,50\text{-}17,50 \text{ dS m}^{-1}$), la zona 4 con muy alto peligro de salinidad (CE: $17,50\text{-}23,00 \text{ dS m}^{-1}$), y la zona 5 con excesivo peligro de salinidad (CE: $23,00\text{-}28,80 \text{ dS m}^{-1}$).

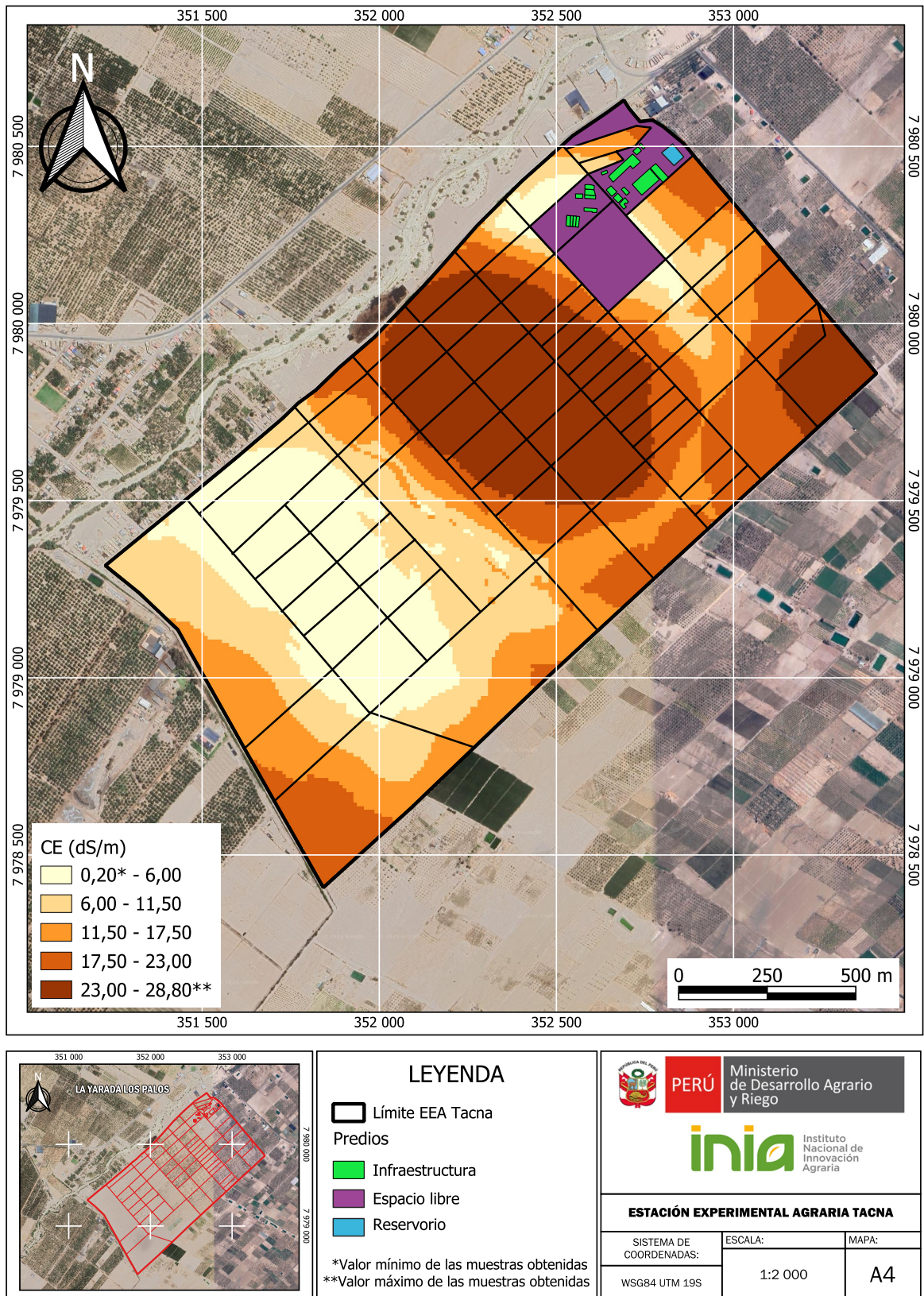


Figura 27. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

Con el fin de mitigar los efectos de la sodicidad identificado en los suelos de la EEA Tacna (Figura 28), se propone la aplicación de enmiendas químicas, siendo el yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), una de las más utilizadas por su capacidad de aportar calcio soluble y favorecer el desplazamiento de sodio de los complejos de intercambio. Para el cálculo de la dosis de yeso, se puede utilizar la fórmula propuesta por Oster et al. (1999):

$$\text{GR} = 0.00086 \times \text{BD} \times \text{D} \times \text{CECe} \times (\text{PSI}_i - \text{PSI}_f)$$

Donde:

- CECe: capacidad de intercambio catiónica efectiva obtenido de la suma de las bases cambiables (cmol kg^{-1}).
- BD: densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).
- D: profundidad del suelo (cm).
- PSI_i : porcentaje de sodio intercambiable actual del suelo (%).
- PSI_f : valor que se desea alcanzar (5%) con la aplicación de yeso agrícola (%).
- GR: requerimiento de yeso agrícola (t ha^{-1}).

A continuación, se calculará la dosis de yeso agrícola para la zona 5 con extremo peligro de salinidad y sodicidad ($\text{CE} = 23,00\text{-}28,80 \text{ dS m}^{-1}$; $\text{PSI}_i = 65,74 \%$; $\text{BD} = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$; $\text{D} = 30 \text{ cm}$; $\text{CECe} = 37 \text{ cmol kg}^{-1}$; $\text{PSI}_f = 5 \%$):

$$\text{GR} = 0,00086 \times 1,3 \times 30 \times 37 \times (65,74 - 5) = 75,38 \text{ t ha}^{-1}$$

De esta manera, para la zona más crítica el requerimiento de yeso sería $75,38 \text{ t ha}^{-1}$, aplicado de forma fraccionada en tasas anuales de 5 t ha^{-1} , durante un período de 15 años para restaurar suelos salinos sódicos.

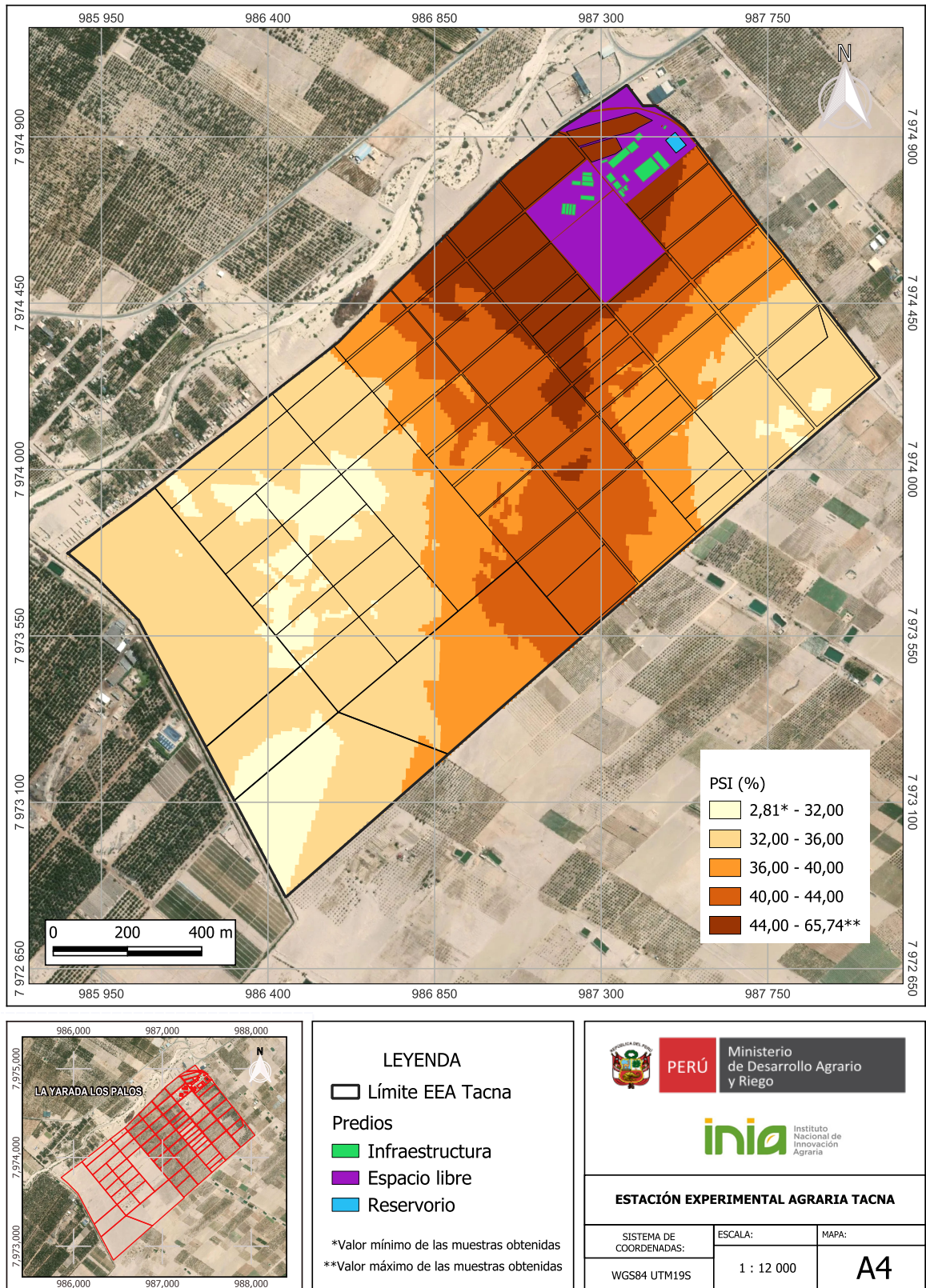


Figura 28. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

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

Los indicadores geoestadísticos del fósforo disponible muestran una estructura espacial débil, con un modelo ajustado de tipo lineal, pero con escasa continuidad espacial efectiva. El *nugget* (C_0) fue de 5248,74 y el *sill* ($C_0 + C$) de 12 525,4, lo que implica que el 41,90 % de la variación total es atribuible al error no estructurado o a fuentes de variabilidad no explicadas por la distancia. Esto sugiere que el fósforo disponible varía fuertemente a pequeña escala, posiblemente asociado a factores locales como la salinidad, compactación o fertilización excesiva.

El rango de autocorrelación espacial es muy bajo ($range = 612,1$ m), y su relevancia práctica es limitada debido a la baja capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0,07$) y un RMSE relativamente alto ($110,74$ mg kg⁻¹). Esta débil estructura espacial limita la confiabilidad de interpolaciones como *kriging* ordinario para generar mapas precisos de disponibilidad de fósforo. En consecuencia, la fertilización fosforada debe ser diseñada con base en análisis de suelo sitio-específicos, preferentemente a escala de lote o sublote, evitando extrapolaciones espaciales imprecisas.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de olivo, se adoptará como referencia un nivel crítico de 8 mg kg⁻¹ y un rendimiento potencial de 20 t ha⁻¹ convencional con alta tecnología. El nivel de fósforo en el 25 % de los suelos analizados es menor a 5,20 mg kg⁻¹ (percentil 25), por lo que se espera respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes fosforados. Para este caso, se tomará como ejemplo este valor de fósforo disponible. En este sentido, el plan de fertilización se formulará considerando los criterios de mantenimiento y construcción de fertilidad, con el objetivo de reponer el fósforo extraído por la cosecha e incrementar las reservas del nutriente en el suelo. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Primer paso: calcular el rendimiento alcanzado con 5,20 mg de P-Olsen por kg de suelo, considerando que con este nivel de fósforo se alcanza un rendimiento relativo de 60 %.

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{60 \times 20 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 12 \text{ t ha}^{-1}$$

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 2 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 2 \text{ kg de P t}^{-1} \times 16,2 \text{ t ha}^{-1} = 32,4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{32,4 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0,30} = 108 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: finalmente calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la Fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 6 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1,0 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = 1,0 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 6 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 108 \text{ kg de P ha}^{-1} + 6 \text{ kg de P ha}^{-1} = 114 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 567,52 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP), el cual tiene una riqueza de 46 % de P₂O₅. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento y construcción de fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo del cultivo de olivo.

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

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 = 134,09 mg kg⁻¹ y R² = 0,04). La media fue de 260,37 mg kg⁻¹, lo que indica un nivel adecuado a bueno para la mayoría de los cultivos, con un rango que va de 59,58 a 935,81 mg kg⁻¹. Aunque en general la disponibilidad de potasio es más homogénea en comparación con otras variables del suelo, algunas zonas con valores cercanos al mínimo podrían requerir suplementación potásica, especialmente si se destinan a cultivos con alta demanda de K. Para este caso, se tomará como ejemplo el valor mínimo de potasio disponible registrado (59,58 mg kg⁻¹) para hacer el cálculo de requerimiento de mantenimiento y construcción:

Para el olivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 150 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 20 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 59,58 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 40 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 59,58 mg de K por kg de suelo, utilizando la Fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{40 \times 20 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 8 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0,35 \times 8 \text{ t ha}^{-1} = 2,80 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 8 \text{ t ha}^{-1} + 2,80 \text{ t ha}^{-1} = 10,80 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K utilizando la Fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 20 kg de potasio por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 10,80 \text{ t ha}^{-1} = 216 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

Quinto paso: determinar el requerimiento de mantenimiento (RM), haciendo uso de la Fórmula 6. 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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{216 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0,70} = 308,57 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 el primer año se estima mediante la Fórmula 8.

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 308,57 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 348,57 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 697,14 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 olivo.





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.
- Bernstein, L. (1965). Salt tolerance of fruit crops. United States Department of Agriculture.
- Boussadia, O., Zgallai, H., Mzid, N., Zaabar, R., Braham, M., Doupis, G., y Koubouris, G. (2023). Physiological responses of two olive cultivars to salt stress. *Plants*, 12(10), 1926. <https://doi.org/10.3390/plants12101926>
- 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*, 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
- Chartzoulakis, K., Psarras, G., Vemmos, S., Loupassaki, M., y Bertaki, M. (2006). Response of two olive cultivars to salt stress and potassium supplement. *Journal of plant nutrition*, 29(11), 2063-2078. <https://doi.org/10.1080/01904160600932682>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- 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/>
- Connor, D. J., y Fereres, E. (2005). The Physiology of Adaptation and Yield Expression in Olive. *Horticultural Reviews*, 31, 155. <https://doi.org/10.1002/9780470650882.ch4>

- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623–5634. <https://doi.org/10.1002/agg2.20995>
- Demo, A. H., Gameda, M. K., Abdo, D. R., Guluma, T. N., y Adugna, D. B. (2025). Impact of soil salinity, sodicity, and irrigation water salinity on crop production and coping mechanism in areas of dryland farming. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(1), 1-22. <https://doi.org/10.1002/agg2.70072>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1a ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Fernández-Escobar, R., Beltrán, G., Sánchez-Zamora, M. A., García-Novelo, J., Aguilera, M. P., y Uceda, M. (2006). Olive oil quality decreases with nitrogen over-fertilization. *HortScience*, 41(1), 215-219. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.1.215>
- 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>
- 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.
- 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>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*, 29, 39-54. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>
- Moral-García, F.J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 1(11), 78-86. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Mrabet, R. (2023). Sustainable agriculture for food and nutritional security. En M. Farooq, N. Gogoi y M. Pisante (Eds.), *Sustainable agriculture and the environment* (pp. 25-90). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00013-0>
- Niebla-Torres, R. E., Barreuzeta-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>
- Oster, J. D., Shainberg, I., y Abrol, I. P. (1999). Reclamation of salt-affected soils. En R. W. Skaggs y J. Van Schilfgaarde (Eds.), *Agricultural Drainage* (pp. 659–691). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c19>
- 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.

- Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613-620. <https://doi.org/10.1071/FP09249>
- 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>
- Shokri, N., Hassani, A. y Sahimi, M. (2024). Multi-Scale Soil Salinization Dynamics From Global to Pore Scale: A Review. *Reviews of Geophysics*, 62, 80. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Sistema Integrado de Estadística Agraria. (2025). Perfil productivo nacional. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6), 1-21. <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Wang, T., Dong, J., Lyu, B., Gao, X., Wang, N. y Shi, Z. (2025). High-resolution global soil salinity and sodicity mapping (1980-2024): Box-Cox-based sample optimization, multi-source remote sensing features, and uncertainty quantification. *Remote Sensing of Environment*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114991>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., 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 Chíncha - Ica











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

ISBN: 978-9972-44-257-5



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

inia

Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria

      @INIAPeru