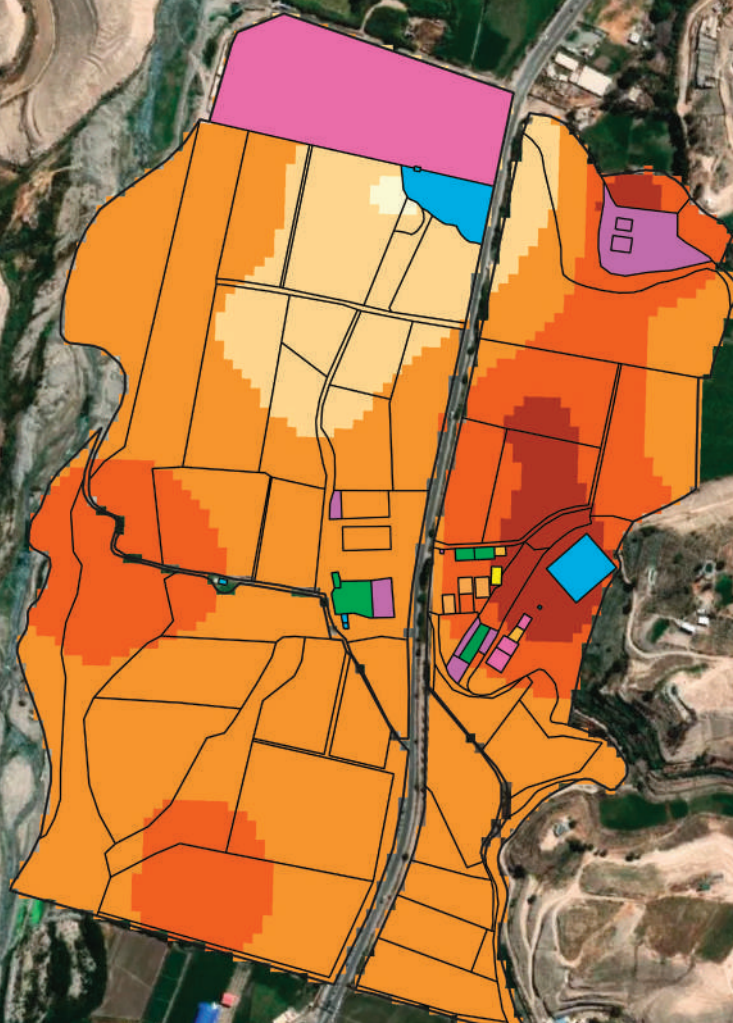


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Moquegua



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 Moquegua



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA MOQUEGUA

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Vladimir Germán Cuno Salcedo

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario

Carmen Inés Vegas Guerrero

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego

Orlando Hernán Chirinos Trujillo

Presidente Ejecutivo del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Primera edición digital:

Febrero, 2026

Publicado:

Febrero, 2026

Disponible en:

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

ISBN:

978-9972-44-246-9

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° 2026-01783

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Albert E. Fernandez-Puquio, Eyner M. Aguilar-Chuquitarqui, Susy P. Layme-Quispe, Sergio W. Copa-Vizcarra, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editor general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Anthony L. Peralta-Guzmán / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante



Tabla de contenido

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Principios fundamentales del análisis de suelos	11
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	11
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	11
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	14
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	21
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	23
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Moquegua	25
3.1. Ubicación de la EEA Moquegua	25
3.2. Muestreo estratificado del suelo	26
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
3.3. Análisis de suelos	29
3.4. Resultados de los análisis de suelos	30
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
3.7. Interpolación kriging y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	34
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	37
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Moquegua	53
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	53
4.1.1. Variación espacial del requerimiento de yeso agrícola en suelos sódicos	53
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	56
4.2.1. Diagnóstico del P disponible del suelo y dosificación de la fertilización fosforada para palto	56
4.3. El pH del suelo	57
5. Referencias bibliográficas	59



Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla 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.

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

El presente documento titulado, “Interpretación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Moquegua”, integra el muestreo, análisis e interpretación de la distribución espacial de las propiedades del suelo. Asimismo, explica de forma clara la metodología de análisis geoespacial, la cual puede ser replicada y aplicada en otros sistemas agrícolas. También, proporciona un diagnóstico detallado del edafosistema en el área de estudio, para facilitar la toma de decisiones en la gestión agrícola sostenible.

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

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

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

La Estación Experimental Agraria (EEA) Moquegua se ubica en la región Yunga, a 1260 m s. n. m., con una precipitación media anual de apenas 20 mm y temperaturas que oscilan entre 12 y 25 °C (Cruz-Luis et al., 2023). Desde el punto de vista edafológico, en la estación se distinguen dos tipos principales de suelos: Fluvisoles y Regosoles éutricos, desarrollados a partir de sedimentos fluviales recientes, lo que les confiere una morfología estratificada de horizontes (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). En esta zona, se generan limitaciones productivas debido a las condiciones climáticas y edáficas, entre ellas el bajo contenido de materia orgánica, pH ligeramente alcalino con presencia de carbonatos, alta variabilidad espacial de macronutrientes y, en determinados sectores, acumulación de sales que compromete la estabilidad física y química del suelo. A ello, se suma que el uso agrícola predominante, con énfasis en maíz, palto, alfalfa, entre otros, enfrenta desafíos relacionados con el manejo inadecuado de fertilización y la presión sobre suelos de distinta calidad productiva.

Frente a este escenario, es fundamental contar con información detallada y actualizada sobre la fertilidad y la variación espacial de los suelos de la EEA Moquegua. El análisis de dicha variabilidad constituye una herramienta clave para identificar zonas con potencial productivo diferenciado y mejorar la eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Reza et al., 2017). Esto ayuda a orientar la investigación y asistencia técnica hacia prácticas de manejo más sostenibles en la región Moquegua.

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo evaluar la fertilidad y la variación espacial de los suelos en la EEA Moquegua, generando información técnica que contribuya a la planificación agrícola y al fortalecimiento de los sistemas productivos de la región. Los objetivos incluyen diagnosticar el estado actual de la fertilidad del suelo, identificar sus principales limitantes, elaborar mapas de variabilidad espacial de propiedades edáficas y recomendar estrategias de manejo orientadas a optimizar el uso de fertilizantes y enmiendas, incrementar la productividad y reforzar la sostenibilidad de los sistemas productivos de la estación.



2. Principios fundamentales de análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación de análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

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

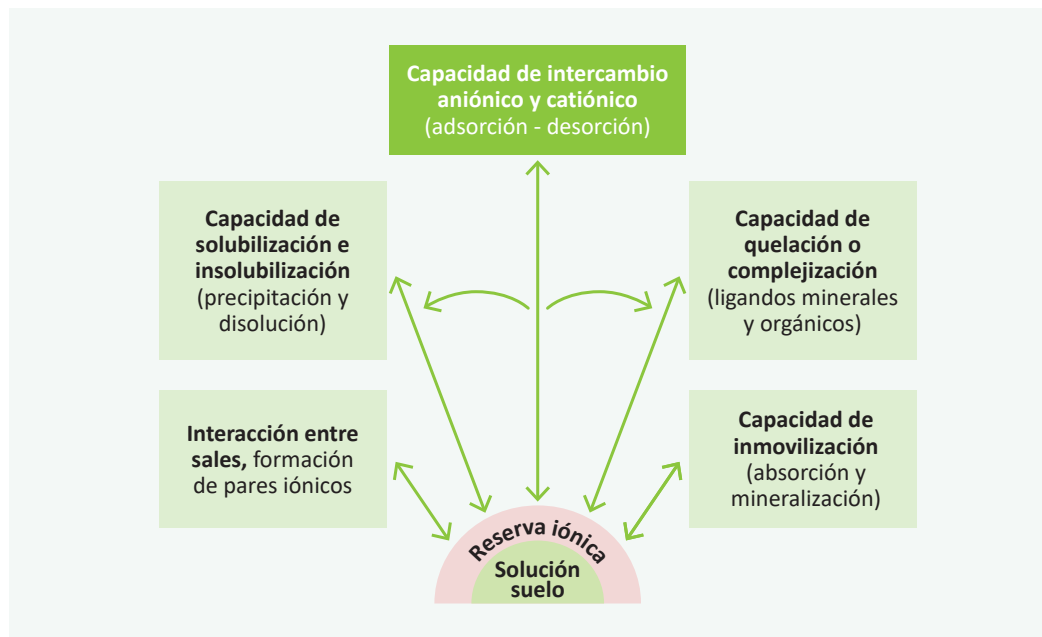


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

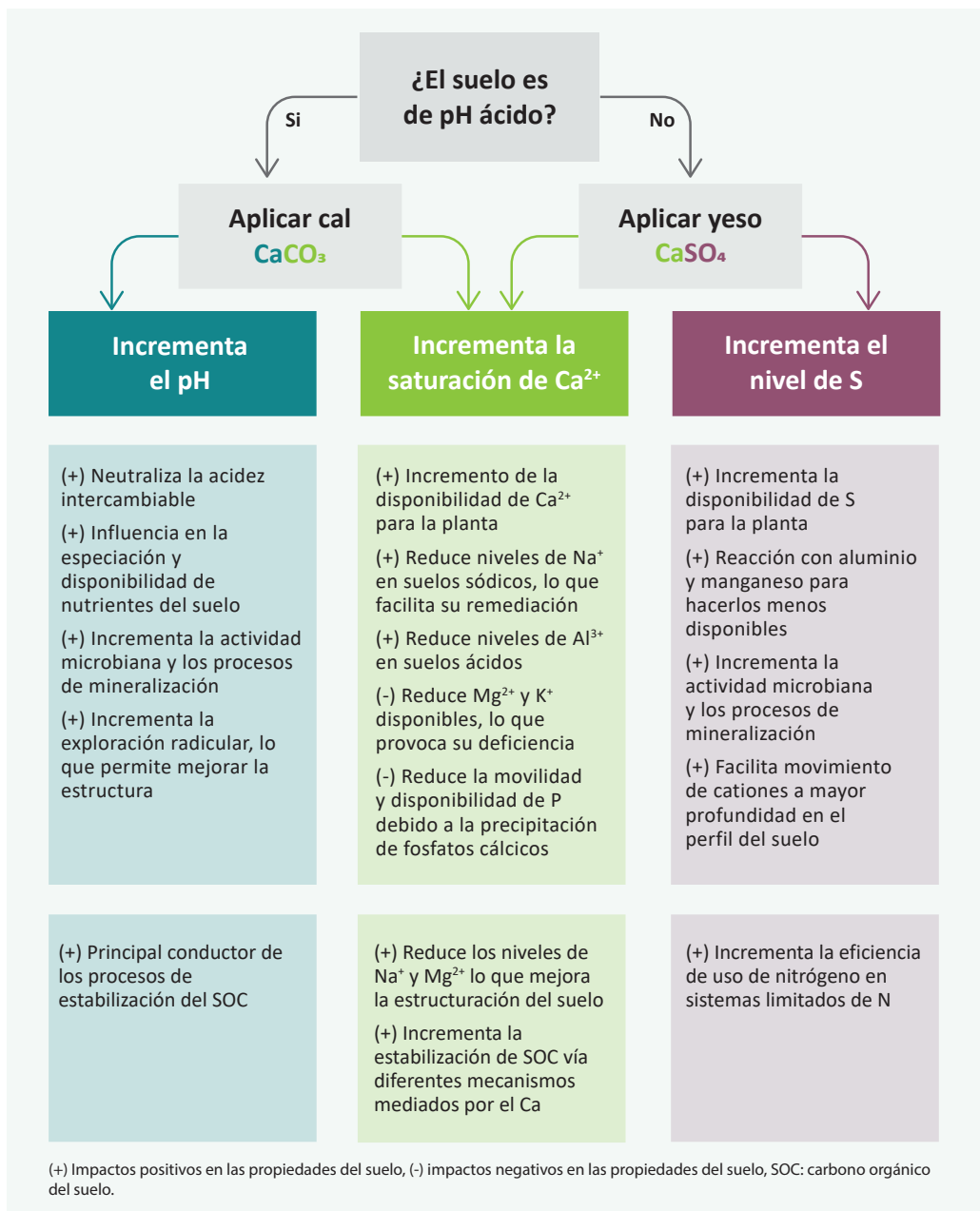


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

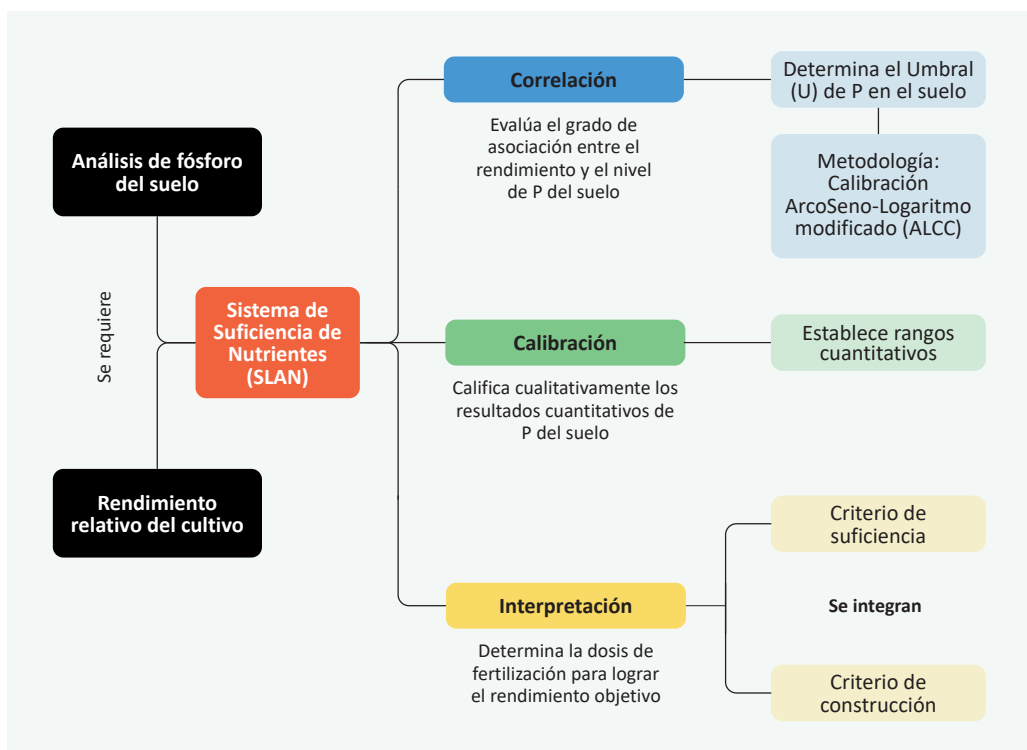


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

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

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

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

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

Ejemplo práctico:

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 15 mg de P por kg de suelo, utilizando el método de Olsen (P-Olsen).

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 15 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

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

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{80 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 24 \text{ t ha}^{-1}$$

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (20 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 24 t ha⁻¹ en lugar de 30 t ha⁻¹.

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 24 \text{ t ha}^{-1} = 8.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de las 24 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 8.4 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 8.4 \text{ t ha}^{-1} + 24 \text{ t ha}^{-1} = 32.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 32.4 \text{ t ha}^{-1} = 34.34 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 34.34 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 32.4 t ha⁻¹, el cual está conformado por 8.4 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 24 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

El criterio de mantenimiento se aplica cuando el análisis del suelo indica un contenido medio-bajo de nutrientes. Además de tener el objetivo de reponer o mantener la cantidad de nutriente extraído por el cultivo, se realiza el ajuste por eficiencia de su uso, para compensar las pérdidas por fijación y adsorción (Buresh et al., 1997).

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de 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 (Barber, 1995; Havlin et al., 2016).

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

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

Ejemplo práctico (Criterio de mantenimiento)

Se realizó un análisis de suelos en un cultivo de palto, y se obtuvo 10 mg de P-Olsen por kg de suelo utilizando el método de Olsen (P-Olsen), el cual se considera un nivel medio.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 10 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

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

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 30 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 15 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 15 \text{ t ha}^{-1} = 5.25 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 15 \text{ t ha}^{-1} + 5.25 \text{ t ha}^{-1} = 20.25 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 20.25 \text{ t ha}^{-1} = 21.47 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

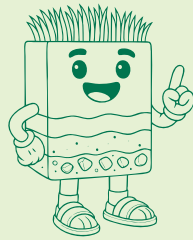
$$\text{Requerimiento de P} = \frac{21.47 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 71.57 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de palto es 71.57 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 20 mg de P-Olsen por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 30 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 5 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



Nota:

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

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

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 9.0 \text{ t ha}^{-1} = 3.15 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 9.0 \text{ t ha}^{-1} + 3.15 \text{ t ha}^{-1} = 12.15 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12.15 \text{ t ha}^{-1} = 12.88 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{RM de P} = \frac{12.88 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 64.4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

Sexto paso: calcular el requerimiento de construcción anual (RC) usando la fórmula 7. Para este cálculo y con fines prácticos se considera que es necesario fertilizar con 9 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg del suelo, a lo cual se denomina necesidad de construcción de fertilidad (NCF), y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo.

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

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

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

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

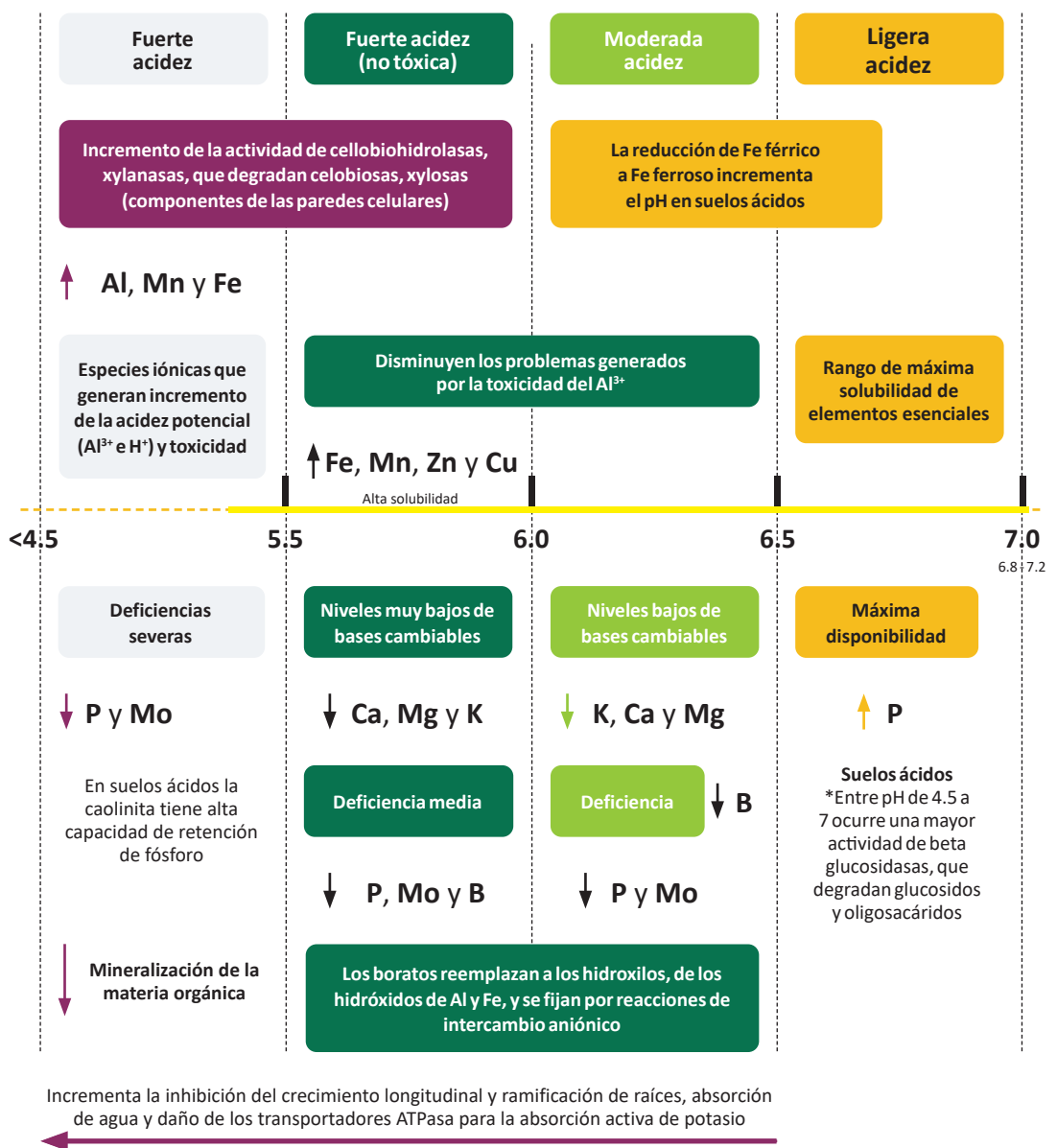
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 64.4 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 77.9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de palto es 77.9 kg por hectárea.

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

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

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



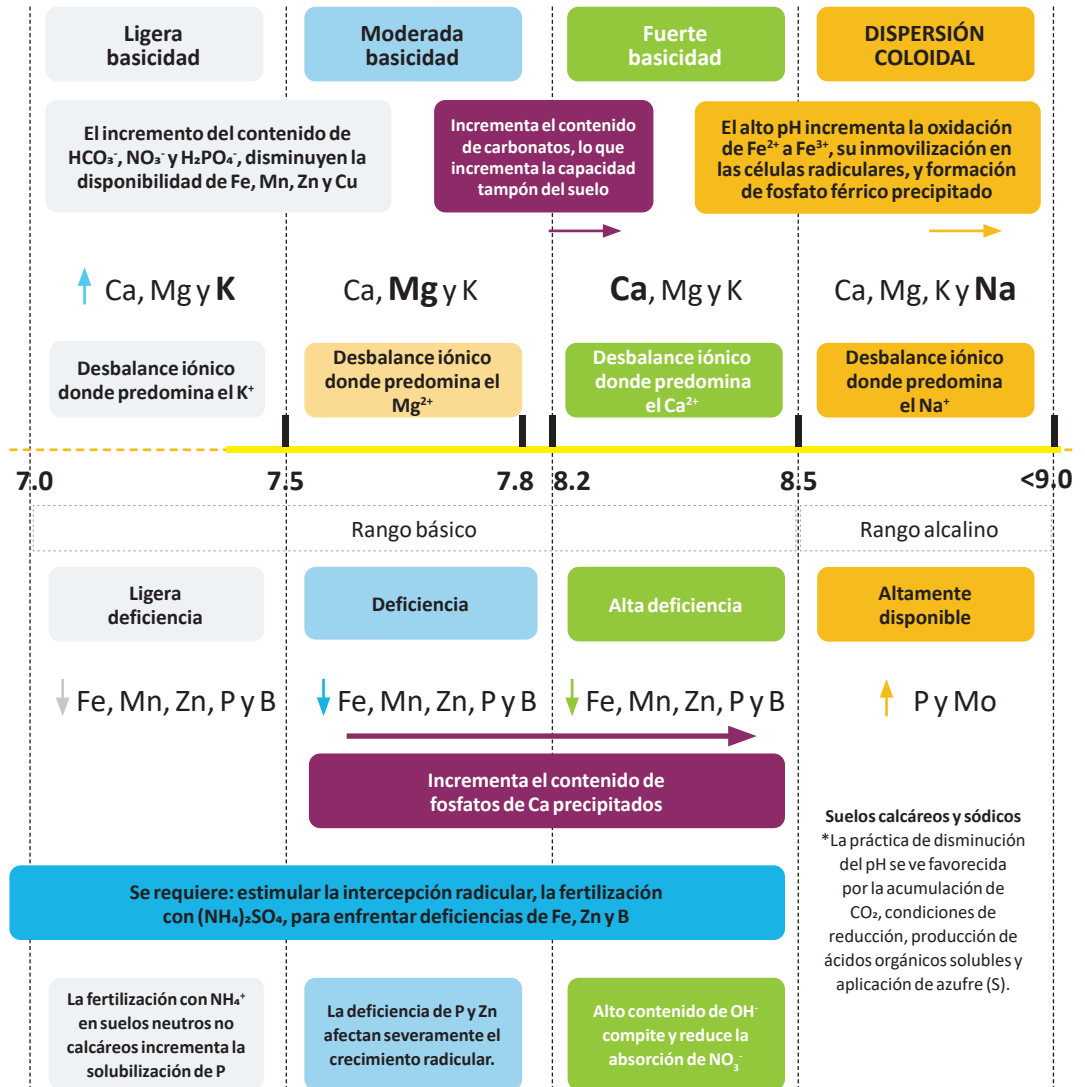
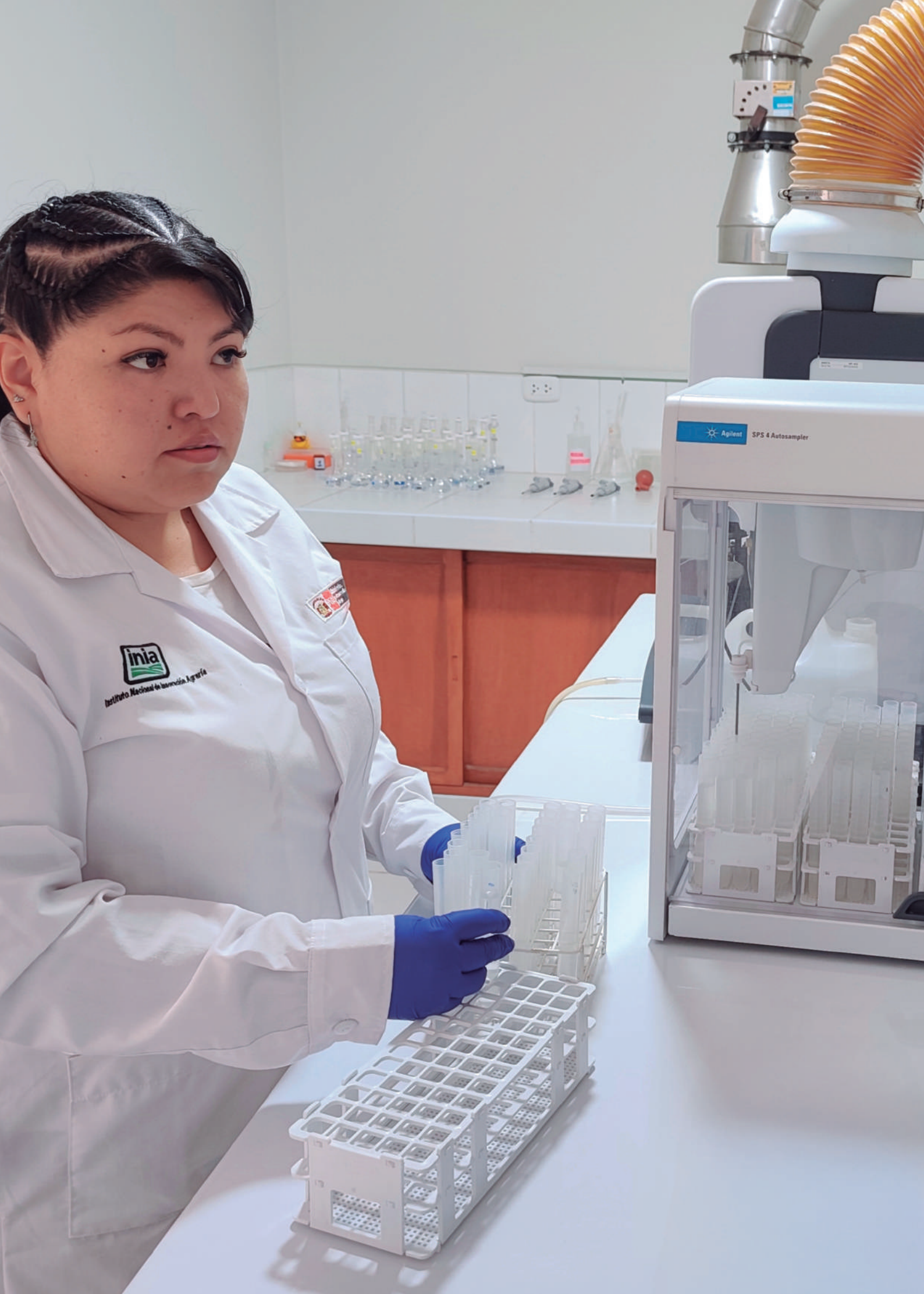


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 como una alternativa a la clasificación taxonómica de suelos (Garbanzo-León et al., 2017). El análisis geoestadístico de las propiedades del suelo es una herramienta útil para evaluar y predecir la variabilidad espacial de las propiedades como pH, textura, densidad aparente y nutrientes (Niebla-Torres et al., 2021). Mediante técnicas de interpolación, como el método *kriging* con ajuste de modelos 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.



inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

Agilent SPS 4 Autosampler

3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Moquegua

3.1. Ubicación de la EEA Moquegua

La EEA Moquegua presenta suelos de tipo Fluvisol éútrico y Regosol éútrico. Estos se han desarrollado a partir de sedimentos fluviales recientes, por lo que tienen una disposición morfológica estratificada de horizontes o capas (INRENA, 1996). Cuenta con tres centros experimentales, con una extensión total de 100.32 ha, siendo los cultivos priorizados: maíz (*Zea mays* L.), palto (*Persea americana* Mill.) y manzano (*Malus doméstica*).

En la estación se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencia técnica y otros servicios para los agricultores de la región Moquegua. La sede de la EEA Moquegua se encuentra en el distrito de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua (Figura 5), en la región Yunga a 1260 m s. n. m. con una precipitación media acumulada anual de 20 mm y temperaturas medias anuales que varían entre 12 y 25 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

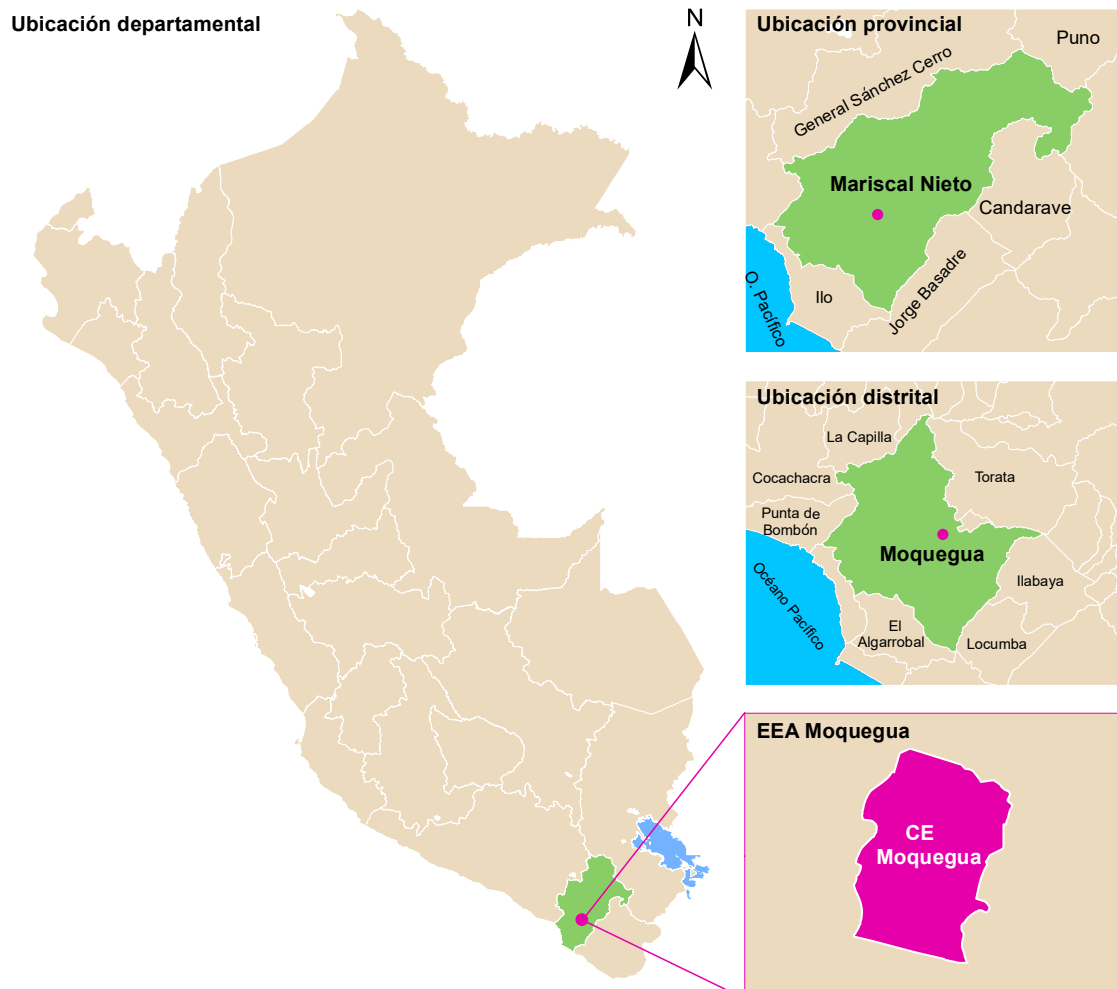


Figura 5. Ubicación de la sede de la EEA Moquegua

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en la EEA Moquegua, se aplicó un diseño de muestreo estratificado basado en unidades de cobertura identificadas mediante análisis de imágenes satelitales. Este enfoque metodológico permite reducir la varianza intraestrato y optimizar la representatividad de las muestras en relación con la heterogeneidad espacial del área evaluada. La estratificación previa al muestreo garantiza una caracterización más precisa de las propiedades edáficas relevantes para el manejo del suelo, como parte de una estrategia integral de monitoreo de fertilidad. El proceso combinó técnicas de clasificación no supervisada y muestreo probabilístico espacial, utilizando herramientas de análisis geoespacial y estadística computacional. A continuación, se detallan los procedimientos aplicados para la determinación y colecta de los puntos de muestreo (Figura 6).

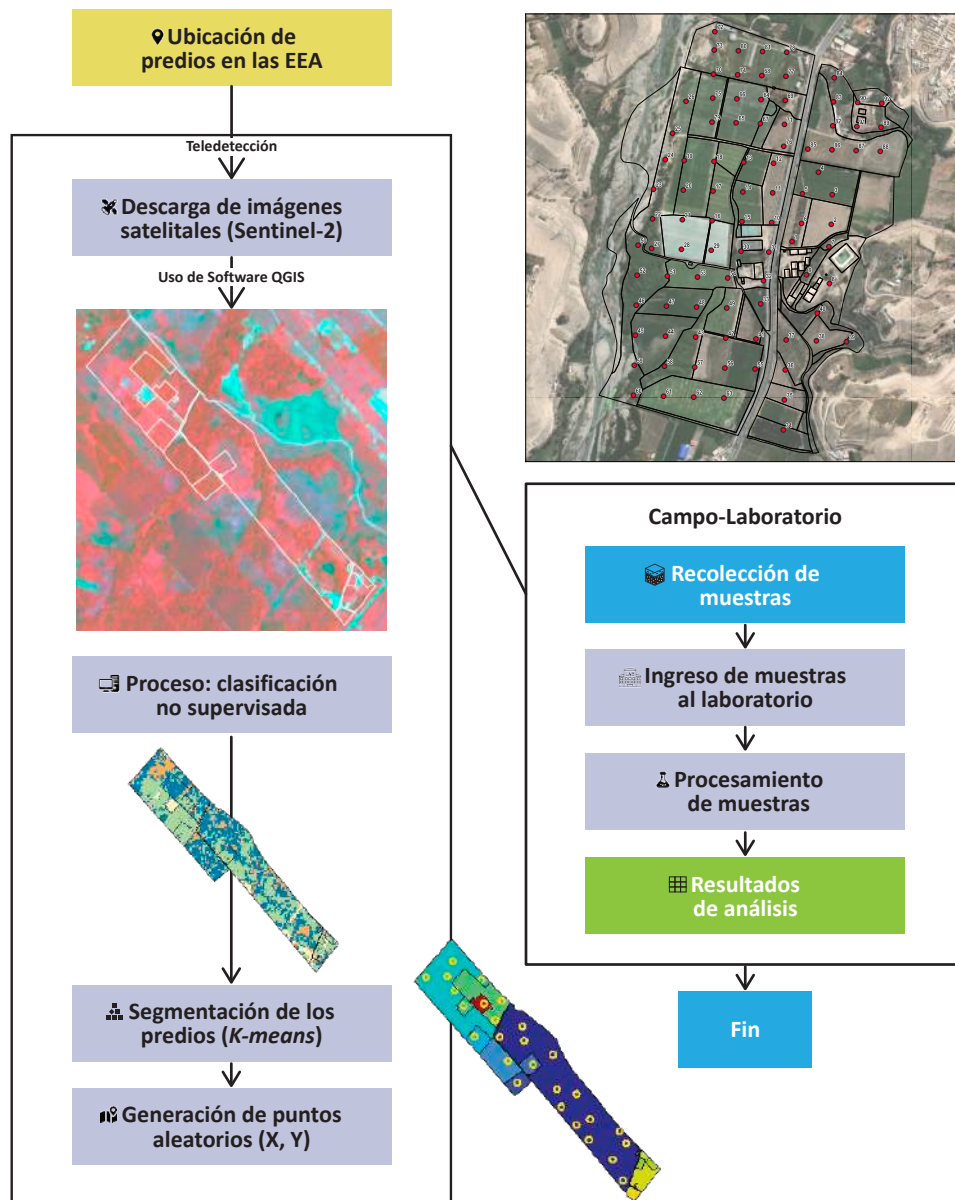


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo

El primer paso para la determinación de los puntos de muestreo fue la descarga de las imágenes satelitales del servidor de Sentinel 2 para identificar las clases de cobertura, utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada **K-means**. Luego, se usó el software R (R Core Team, 2018) para determinar los puntos de muestreo utilizando la función *spsample* del paquete *sp* (Pebesma y Bivand, 2005). El *script* R generó las coordenadas de los puntos de muestreo según cada clase determinada, mediante el método de muestreo estratificado. Se identificaron en total 92 puntos de muestreo de suelos, como se observa en la Figura 7.

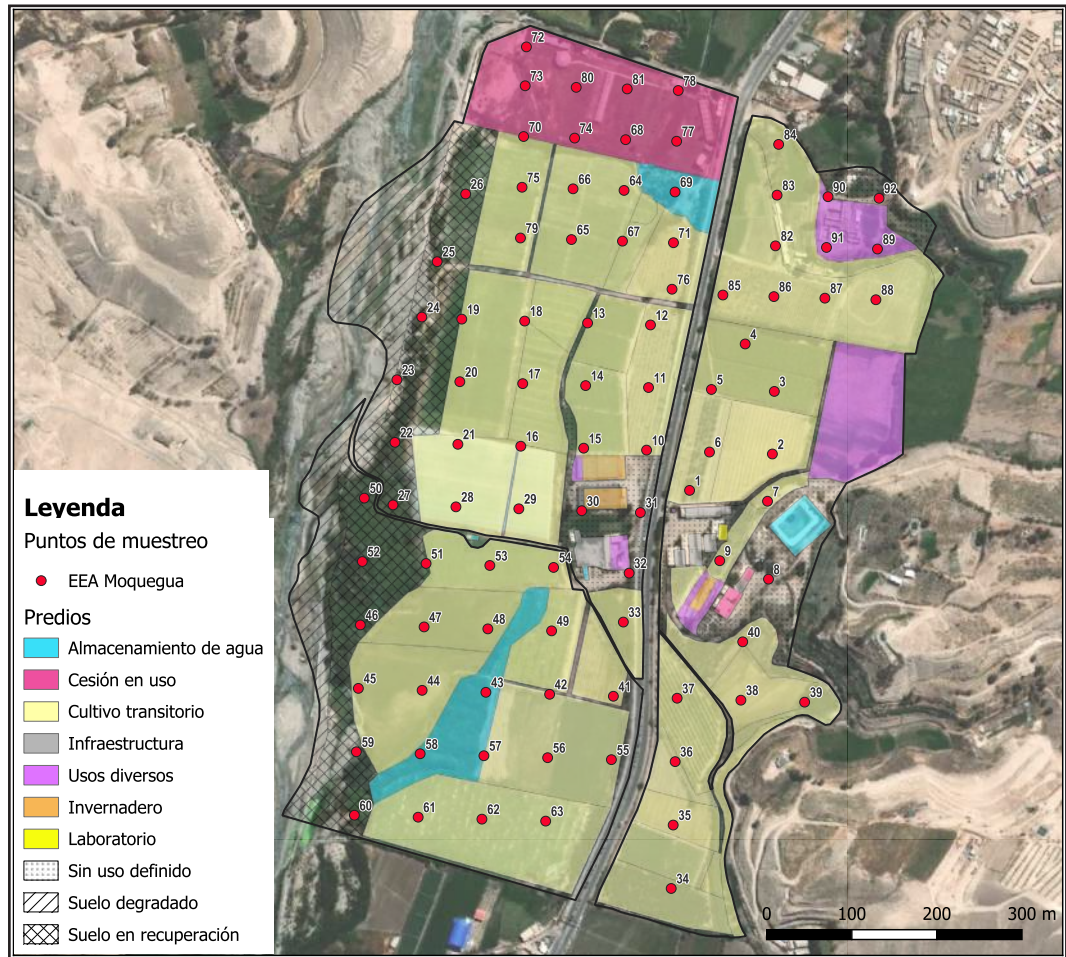


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Moquegua

3.2.2. Muestreo del suelo en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 92 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 suelo. A) Limpieza y realización del hoyo, B) colecta del suelo, C) desterronamiento y eliminación de raicillas, y D) separación y etiquetado de la muestra (adaptado de Díaz-Chuquizuta et al., 2025)

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la EEA 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 Walkley y Black	SEMARNAT (2002)
N total	ISO 11261: determinación de Nitrógeno Total por Kjeldahl Modificado	ISO (1995)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Olsen	SEMARNAT (2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
Bases intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Extracción con acetato de amonio	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados de la caracterización edáfica de la EEA Moquegua (Tabla 2) muestran que los suelos presentan, en promedio, una textura franco-arcillosa (44.72 % arena, 17.89 % limo y 37.39 % arcilla). La variabilidad de la arena y la arcilla es moderada (CV = 20-22 %), mientras que del limo es alta (CV = 34.07 %), lo cual sugiere inconsistencias en la determinación o presencia de horizontes muy contrastantes debido a la naturaleza estratificada de los sedimentos fluviales. Esta heterogeneidad textural puede generar diferencias marcadas en la retención de humedad y en la dinámica de nutrientes a escala local.

El pH del suelo es ligeramente alcalino (7.74 ± 0.31 , CV = 4 %), con una distribución estrecha entre 7.10 y 8.40. Este comportamiento, junto con la presencia de carbonatos de calcio ($\text{CaCO}_3 = 4.07 \% \pm 1.36 \%$), indica un medio con capacidad amortiguadora moderada que puede limitar la disponibilidad de micronutrientes esenciales como hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn).

La conductividad eléctrica en extracto de saturación promedio es elevado ($9.17 \text{ dS m}^{-1} \pm 0.77$), con baja variabilidad (CV = 8.37 %) y valores de hasta 12.86 dS m^{-1} , lo que evidencia la existencia de sectores con problemas de salinidad, aunque la mediana (9.17 dS m^{-1}) revela que parte de los suelos mantiene condiciones menos restrictivas.

El contenido de materia orgánica es bajo ($1.64 \% \pm 1.13$, CV = 69.32 %), con valores mínimos de 0.20 %, lo que refleja una condición de fertilidad orgánica limitada, consistente con el clima árido de la región. El nitrógeno total ($0.08 \% \pm 0.06$, CV = 68.22 %) muestra también niveles reducidos y alta variabilidad, lo que confirma la necesidad de estrategias de manejo orientadas a incrementar el aporte de residuos y enmiendas orgánicas.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de fósforo disponible son elevados en promedio ($40.77 \text{ mg kg}^{-1} \pm 59.76$), pero con una variabilidad muy alta (CV = 146.58 %) y valores extremos que superan los 500 mg kg^{-1} . Esto sugiere la presencia de *hotspots* de acumulación, probablemente vinculados a aplicaciones puntuales de fertilizantes. El potasio disponible presenta un patrón similar: aunque el promedio es alto ($351.55 \text{ mg kg}^{-1}$), la variabilidad es extrema (CV = 170.81 %) y se registran valores máximos de hasta $5718.17 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que indica una distribución espacial desigual.

Respecto al complejo de intercambio catiónico, el calcio intercambiable presenta valores altos ($33.37 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 8.86$), en coherencia con la presencia de carbonatos y la reacción alcalina del suelo. El magnesio ($2.53 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 0.71$) se encuentra en niveles adecuados, mientras que el potasio intercambiable ($1.25 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 1.94$) evidencia gran dispersión (CV = 154.74 %). El sodio ($3.23 \text{ cmol kg}^{-1} \pm 4.41$) alcanza valores extremos de hasta $16.86 \text{ cmol kg}^{-1}$, con una variabilidad elevada (CV = 136.47 %), lo que indica la presencia de sectores con riesgo de sodicidad que pueden comprometer la estabilidad física del suelo y la infiltración de agua.

En resumen, los suelos de la EEA Moquegua se caracterizan por una textura predominantemente franco-arcillosa, un pH alcalino con moderada presencia de carbonatos, baja fertilidad orgánica y una fertilidad química contrastante, con deficiencias generalizadas de materia orgánica y nitrógeno, y con fósforo, potasio y sodio distribuidos de manera muy heterogénea. Estas condiciones demandan un manejo diferenciado por ambientes, priorizando la incorporación de materia orgánica, la aplicación localizada de fertilizantes balanceados, y el manejo de la salinidad y sodicidad en sectores críticos.

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

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
pH	unidad	7.74	0.31	4.05	7.70	7.10	8.40	-0.07
CEe	dS m ⁻¹	9.17	0.77	8.37	9.10	7.94	12.86	1.52
MO	%	1.64	1.13	69.32	1.50	0.20	9.90	4.46
P disp.	mg kg ⁻¹	40.77	59.76	146.58	27.26	5.11	533.74	6.35
K disp.	mg kg ⁻¹	351.55	600.47	170.81	253.13	55.99	5718.17	7.89
Arena	%	44.72	9.30	20.79	44.74	25.94	86.77	1.00
Limo	%	17.89	6.09	34.07	18.13	1.99	28.86	-0.32
Arcilla	%	37.39	7.96	21.30	38.14	4.30	60.00	-0.31
N total	%	0.08	0.06	68.22	0.08	0.01	0.50	4.52
CaCO ₃	%	4.07	1.36	33.49	3.93	1.82	8.94	0.73
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	33.37	8.86	26.55	31.63	15.16	57.77	0.44
K ⁺	cmol kg ⁻¹	1.25	1.94	154.74	0.87	0.18	17.90	7.08
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	2.53	0.71	27.94	2.40	1.10	5.01	1.08
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	3.23	4.41	136.47	1.39	0.00	16.86	1.77
ClCe	cmol kg ⁻¹	40.39	13.92	34.46	37.06	17.88	97.54	1.22
PCI	%	84.32	5.96	7.07	86.12	59.22	91.61	-1.47
PPI	%	2.88	2.35	81.54	2.41	0.61	18.35	3.89
PMI	%	6.55	1.47	22.42	6.50	2.34	12.76	0.43
PSI	%	6.25	6.40	102.43	3.93	0.00	23.43	1.42

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

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

- a. **Computador:** QGIS instalado (versión recomendada: 3.28 o superior).
- b. **Complemento:** *Smart-Map* instalado y configurado.
- c. **Base de datos:** *shapefile* de los puntos de muestreo del suelo con información georreferenciada y valores de la variable a analizar.
- d. **Unidades y proyección:** las capas de entrada (puntos georreferenciados y contorno del área de estudio) estén en el sistema métrico *Universal Transversal Mercator* (UTM), cuyas unidades son los metros.

Procedimiento:

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

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

Procedimiento:

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

La caracterización geoestadística de los suelos de la EEA Moquegua permitió identificar estructuras espaciales definidas en varias propiedades edáficas, particularmente en aquellas relacionadas con el complejo de intercambio catiónico (Tabla 3). Variables como el porcentaje de potasio intercambiable (PPI) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mostraron una dependencia espacial fuerte, con valores de R^2 de 0.85 y 0.81, respectivamente. Estas propiedades fueron modeladas principalmente mediante funciones esféricas, con rangos de predicción que superan los 500 m. Esto indica una alta predictibilidad espacial y ofrece una base sólida para la generación de mapas y la implementación de estrategias sitio-específicas de fertilización y manejo del suelo.

Las propiedades texturales presentaron comportamientos contrastantes: la arena y la arcilla mostraron una dependencia espacial baja, con valores de R^2 de 0.13 y 0.23, respectivamente. Esto refleja una distribución heterogénea poco estructurada de estas fracciones. En contraste, el limo exhibió un patrón espacial fuerte ($R^2 = 0.98$), con un rango de 414 m, lo que facilita la delimitación de unidades del suelo con comportamiento físico diferenciado, útiles en la planificación del riego y el manejo de cultivos.

En el caso de los nutrientes, el fósforo disponible, el potasio disponible y el nitrógeno total presentaron ajustes bajos, con valores de $R^2 = 0.19$, $R^2 = 0.17$ y $R^2 = 0.21$, respectivamente. Esto indica un comportamiento casi aleatorio, lo que limita la aplicación de técnicas geoestadísticas para estas propiedades. En contraste, la materia orgánica mostró una organización espacial moderada ($R^2 = 0.5$).

Los cationes intercambiables evaluados mostraron, en general, una estructura espacial débil a moderada. El calcio intercambiable ($R^2 = 0.33$) y el magnesio intercambiable ($R^2 = 0.37$) presentaron bajos niveles de ajuste geoestadístico, lo que indica una distribución espacial heterogénea y limitada para la delimitación precisa de zonas de manejo. El sodio intercambiable ($R^2 = 0.53$) evidenció una organización espacial moderada, permitiendo identificar sectores con mayor acumulación que podrían representar riesgo de sodicidad.

El potasio intercambiable ($R^2 = 0.08$) presentó una organización espacial muy débil, reflejando alta variabilidad a escala local y restringiendo su uso para la zonificación basada únicamente en interpolación espacial. De manera similar, la capacidad de intercambio catiónico ($R^2 = 0.34$) y los porcentajes de calcio ($R^2 = 0.31$) y magnesio intercambiables ($R^2 = 0.19$) mostraron una dependencia espacial baja.

En conjunto, los resultados indican que los suelos de la EEA Moquegua presentan una variabilidad espacial compleja, por lo que las herramientas geoestadísticas deben emplearse como apoyo al análisis del suelo. Para mejorar la definición de zonas de manejo, se recomienda complementar la información espacial con muestreos más densos y criterios edáficos y de manejo adicionales.

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

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R^2
pH	<i>Gaussian</i>	0.07	0.15	371.59	0.27	0.24
CEe	<i>Exponential</i>	0.01	0.10	576.84	0.31	0.22
MO	<i>Gaussian</i>	0.09	0.11	289.30	1.15	0.50
P disp.	<i>Gaussian</i>	0.73	1.01	576.84	0.69	0.19
K disp.	<i>Exponential</i>	0.39	0.94	576.84	0.92	0.17
Arena	<i>Spherical</i>	0.18	0.32	1046.47	0.58	0.13
Limo	<i>Gaussian</i>	0.24	0.84	414.22	4.40	0.98
Arcilla	<i>Spherical</i>	0.03	0.16	223.45	0.45	0.23
N total	<i>Exponential</i>	0.04	0.08	374.20	0.05	0.21
CaCO ₃	<i>Spherical</i>	0.08	0.19	161.47	0.08	0.75
Ca ²⁺	<i>Gaussian</i>	0.15	0.45	547.91	0.55	0.33
K ⁺	<i>Spherical</i>	0.41	0.76	487.62	0.41	0.08
Mg ²⁺	<i>Gaussian</i>	0.22	0.34	142.43	0.08	0.37
Na ⁺	<i>Spherical</i>	0.41	0.72	584.50	3.03	0.53
CIce	<i>Exponential</i>	0.21	0.59	534.61	0.62	0.34
PCI	<i>Gaussian</i>	0.06	0.18	584.06	0.36	0.31
PPI	<i>Spherical</i>	0.97	2.20	539.18	0.16	0.85
PMI	<i>Exponential</i>	0.07	1.87	475.38	1.32	0.19
PSI	<i>Spherical</i>	0.27	0.64	584.55	0.66	0.81

CEe: conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, N total: nitrógeno total, CIce: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, RMSE: raíz del error cuadrático medio, R^2 : coeficiente de determinación.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para la EEA Moquegua (Figuras 9-22) muestran procesos edáficos contrastantes que condicionan la fertilidad y el manejo de los predios experimentales. El rasgo más destacado es la presencia de un patrón alcalino moderado (pH entre 7.1 y 8.4, asociado a contenidos de Ca^{2+} y CaCO_3) con continuidad espacial amplia. Esta condición confiere al suelo un moderado poder amortiguador, y al mismo tiempo limita la disponibilidad de micronutrientes como Fe, Zn y Mn, generando deficiencias funcionales a pesar de que sus reservas totales no sean necesariamente bajas.

Los mapas de conductividad eléctrica y de sodio intercambiable revelan la existencia de parches salinos y zonas con sodicidad localizada, donde los valores elevados comprometen la germinación, la fisiología de las plantas y la estabilidad estructural del suelo. Esta condición se acentúa en sectores donde las sales alcanzan valores altos en el extracto de saturación, confirmando la presencia de áreas con suelos salinos a fuertemente salinos.

En relación con los nutrientes, los mapas de fósforo y potasio disponible muestran la existencia de *hotspots* de acumulación, resultado de aplicaciones localizadas de fertilizantes que han generado una fuerte heterogeneidad en la fertilidad. Este patrón implica riesgos de sobrefertilización en algunos sectores y deficiencias en otros, lo que refuerza la necesidad de estrategias de fertilización variable.

La materia orgánica y el nitrógeno total presentan una estructura espacial débil, lo que restringe su utilidad para la delimitación precisa de unidades de manejo. De manera similar, las fracciones texturales evidencian una organización espacial limitada, particularmente la arena y la arcilla. En contraste, el limo muestra una estructura espacial óptima, lo que permite identificar unidades físicas relativamente homogéneas con influencia directa en la retención de humedad, el drenaje y la respuesta a prácticas de manejo.

Los mapas evidencian zonas con pH alcalino y presencia de carbonatos de calcio, donde se recomienda priorizar la corrección de deficiencias de micronutrientes mediante fertilización foliar o quelatados, evitando intervenciones orientadas a modificar drásticamente la reacción del suelo. Los focos salinos y sódicos requieren diagnóstico de origen (agua de riego, drenaje deficiente, acumulación superficial) y, cuando sea posible, manejo con lavado, mejora de drenaje y aplicación localizada de enmiendas como yeso agrícola. En las áreas con acumulación de fósforo y potasio se recomienda implementar esquemas de fertilización variable que optimicen costos y eviten excesos.

En síntesis, los mapas de la EEA Moquegua constituyen una herramienta fundamental para la definición de unidades de manejo (UM), las cuales deben sustentarse principalmente en variables con mayor confiabilidad espacial (limo, PPI y PSI). Las propiedades con menor predictibilidad espacial (K^+ , arena, P disp. y K disp. y PMI), deben complementarse con muestreos más densos y prácticas de manejo generalizadas, orientadas a mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad del suelo.

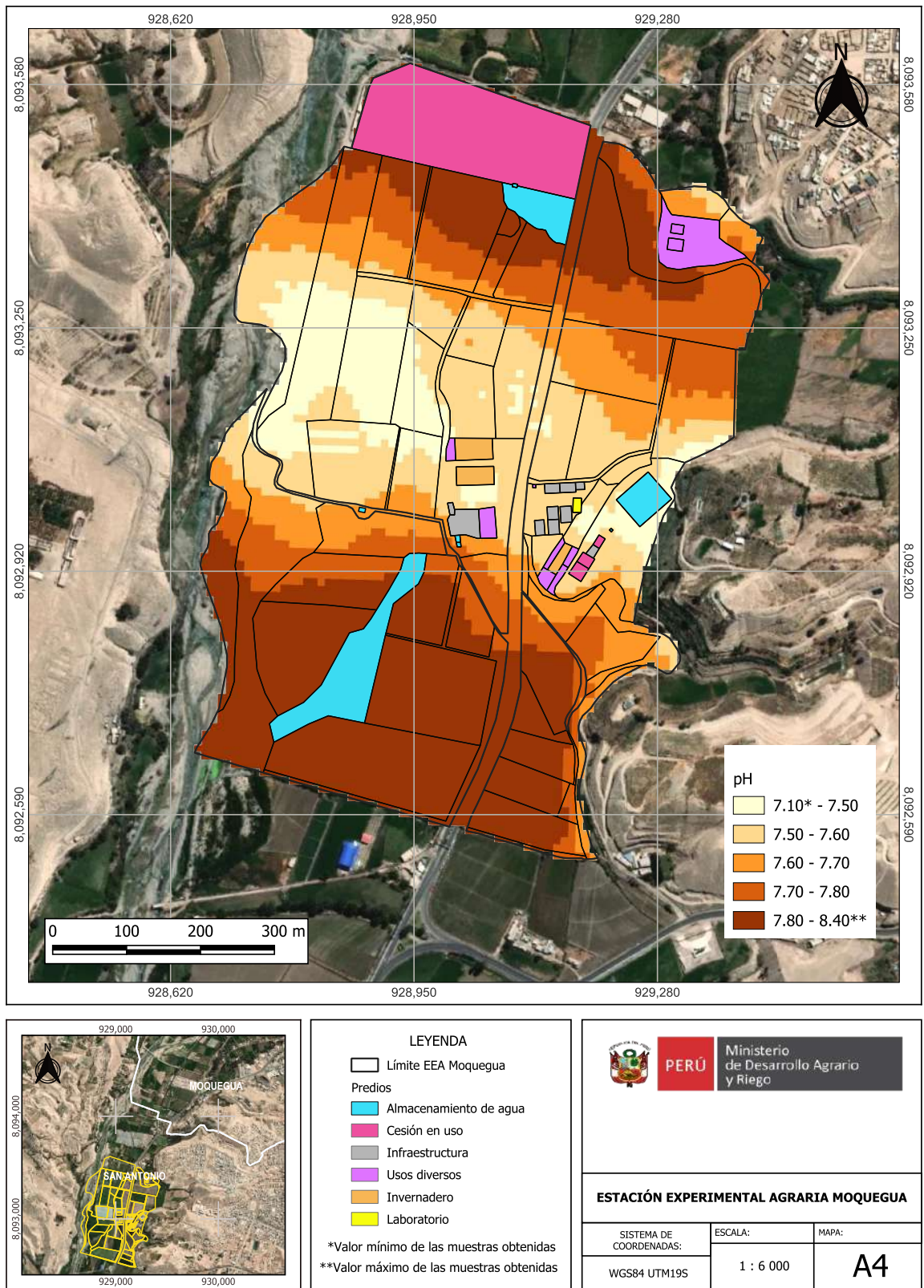


Figura 9. Mapa de variación espacial del pH

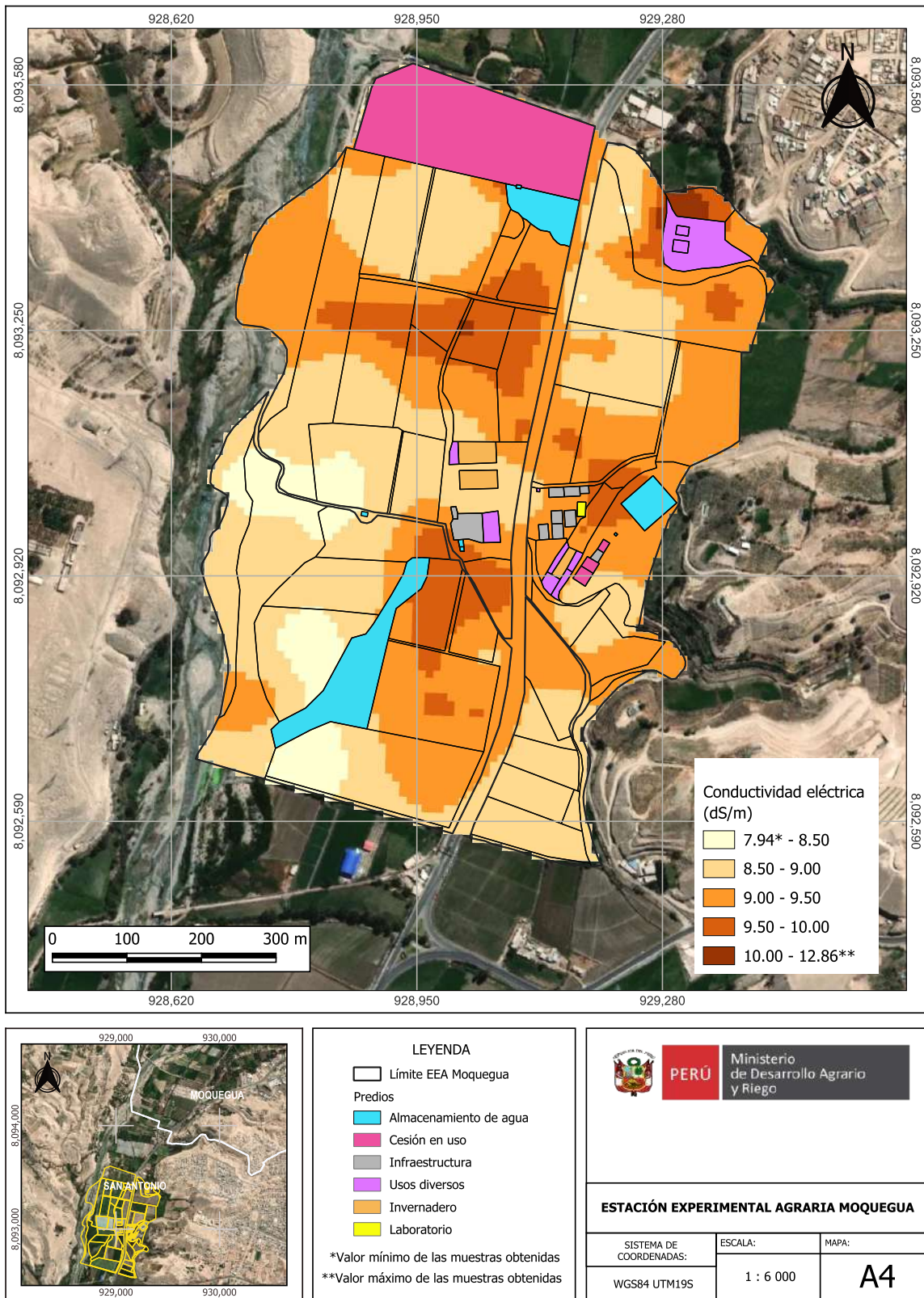


Figura 10. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

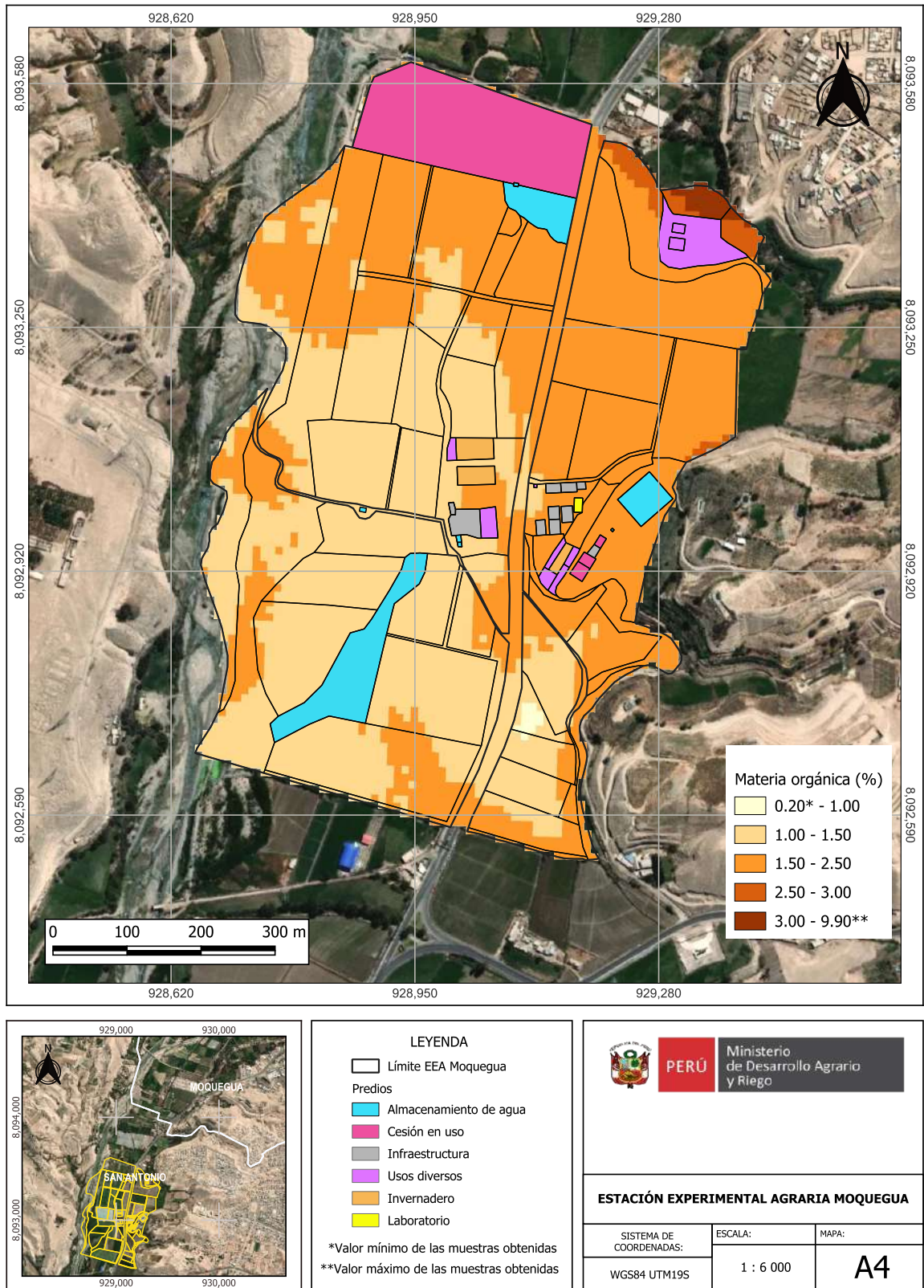


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

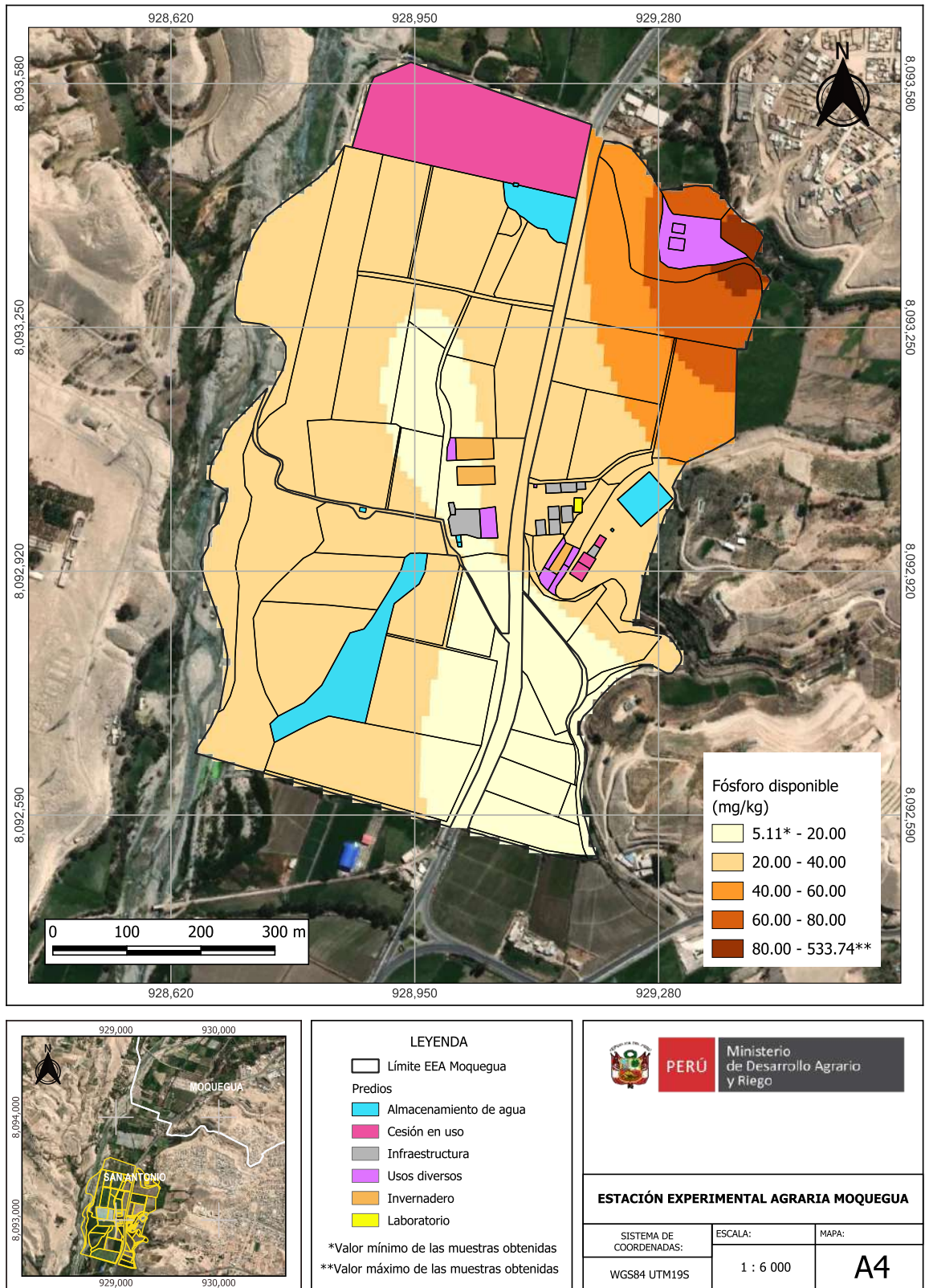


Figura 12. Mapa de variación espacial de fósforo disponible

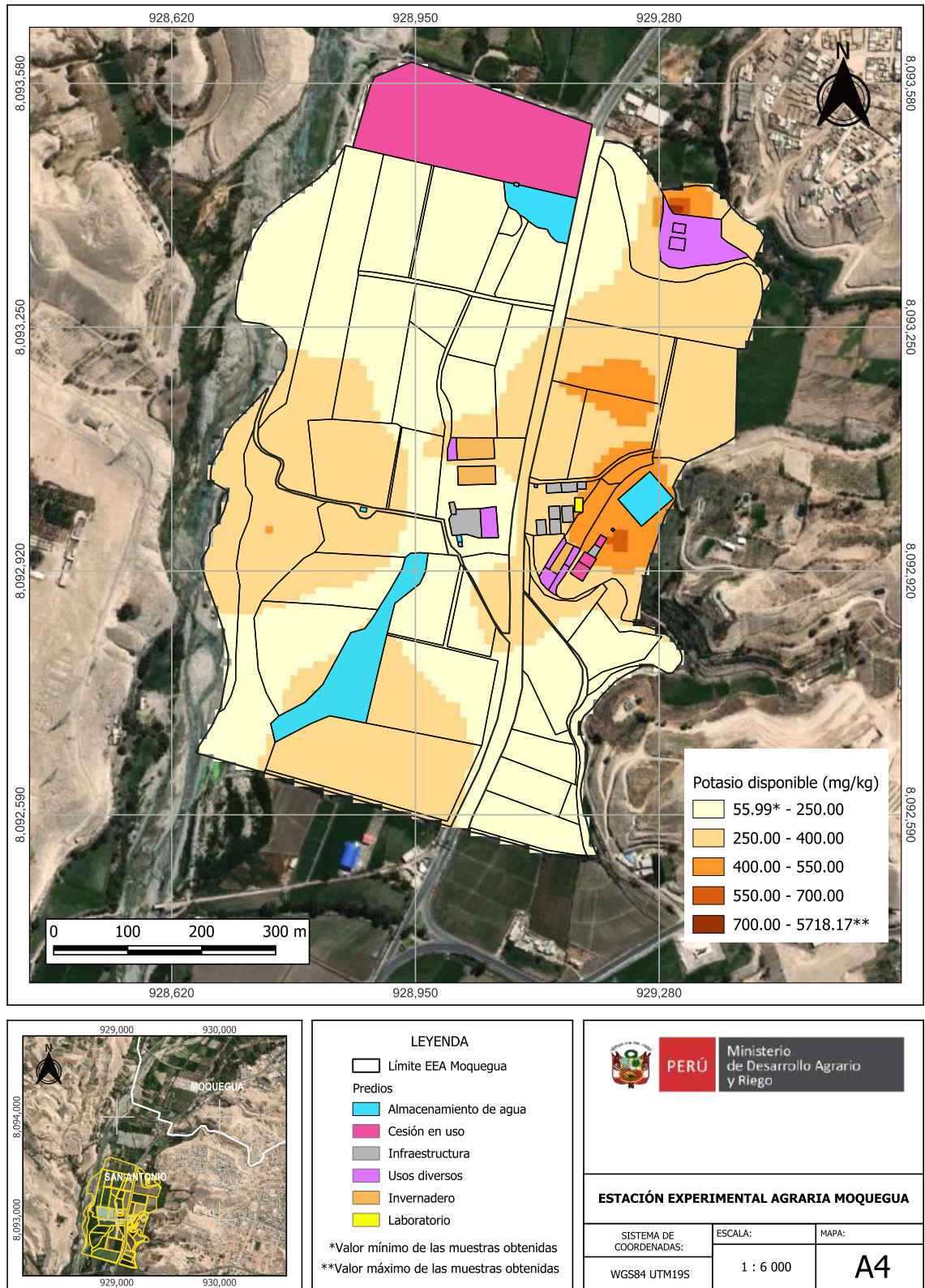


Figura 13. Mapa de variación espacial del potasio disponible

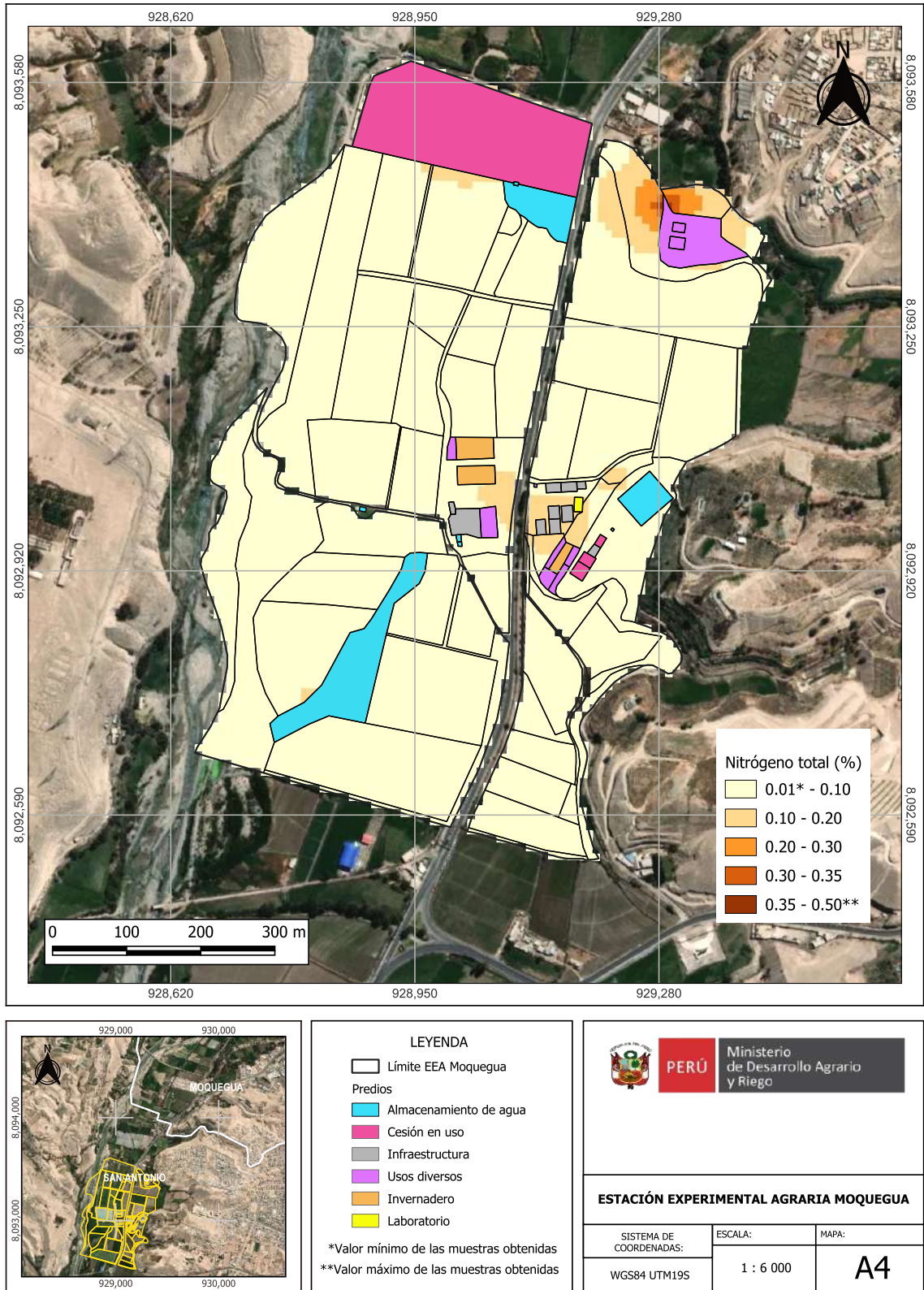


Figura 14. Mapa de variación espacial del porcentaje de nitrógeno total

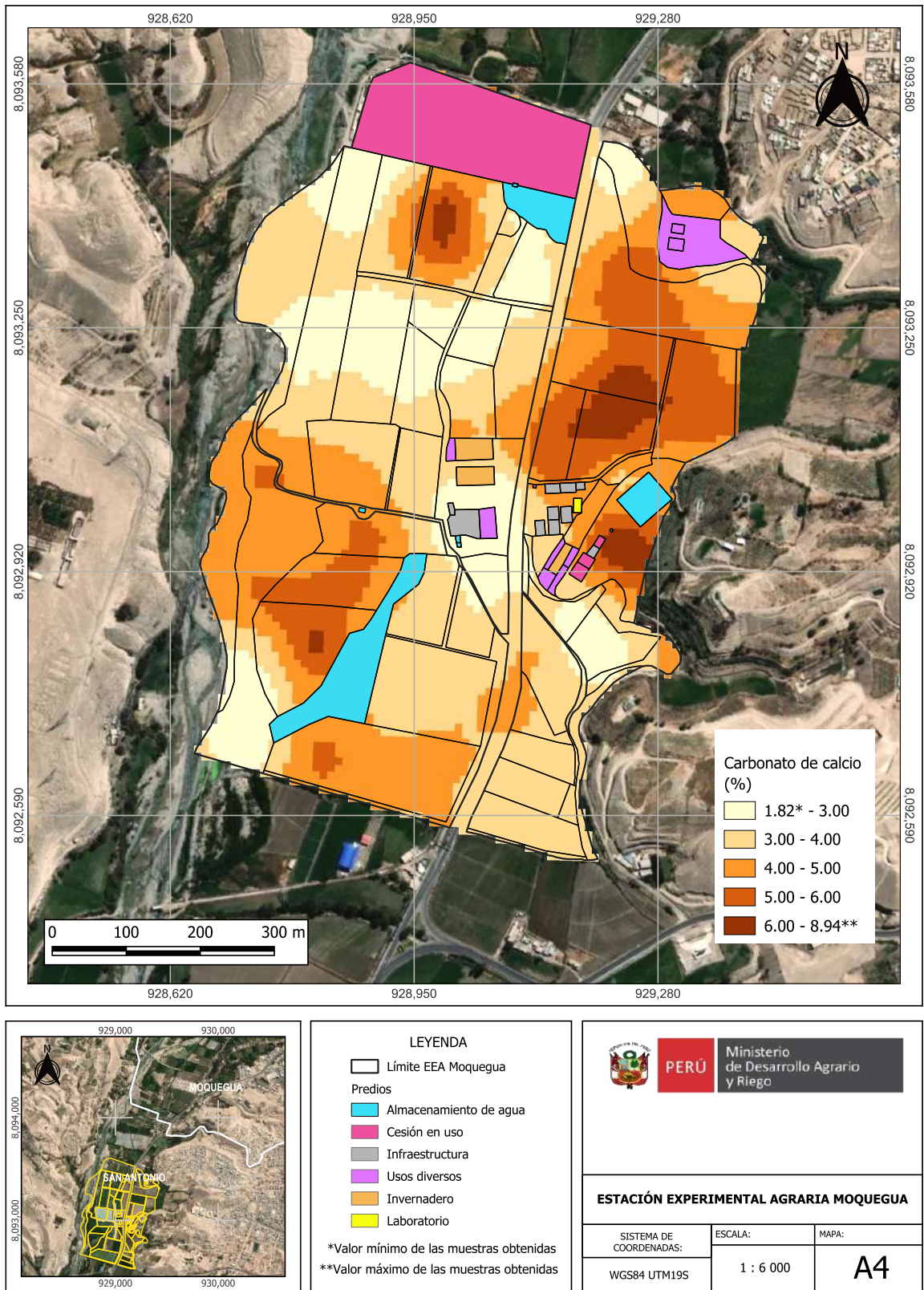


Figura 15. Mapa de variación espacial del porcentaje de carbonato de calcio

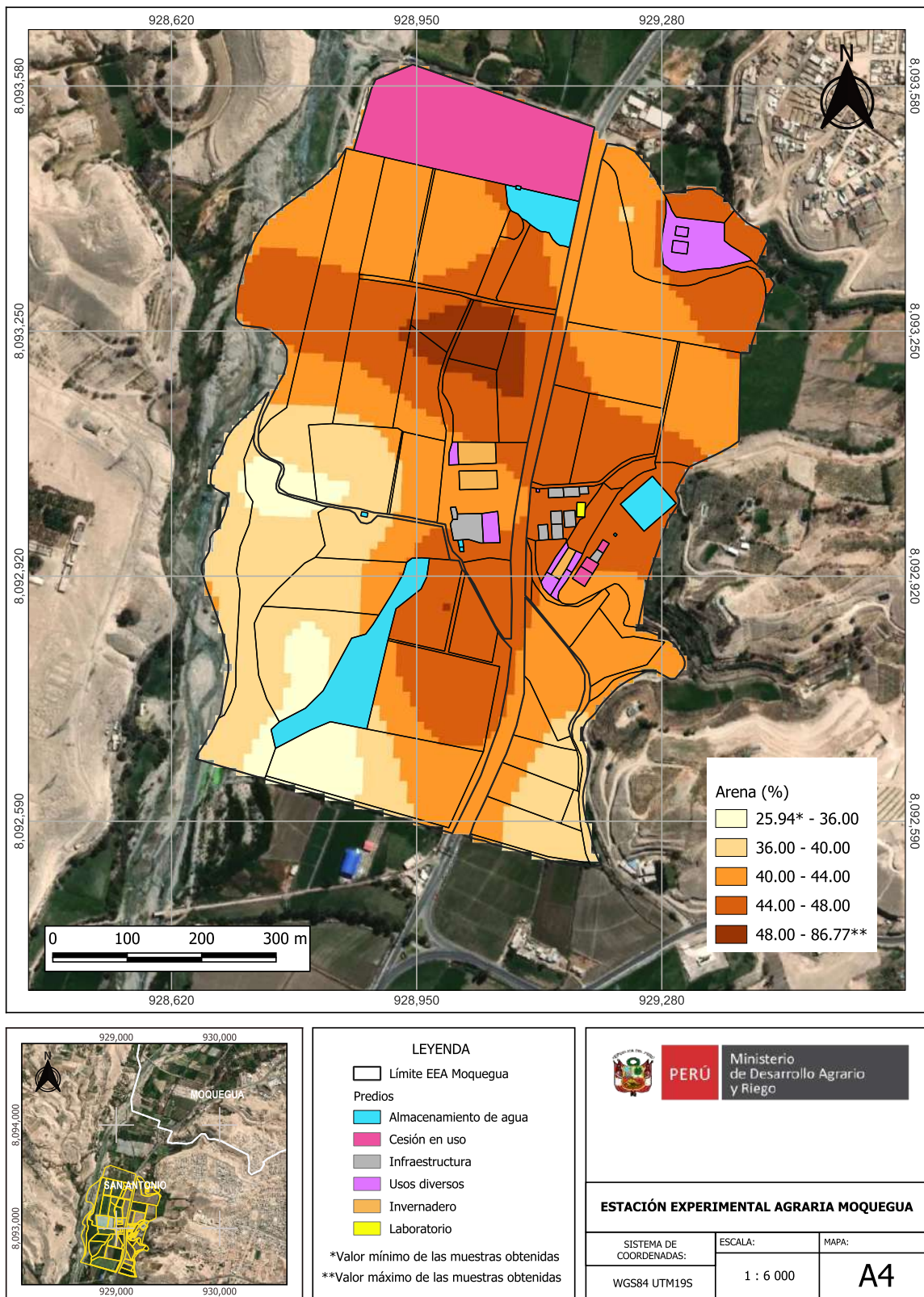


Figura 16. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

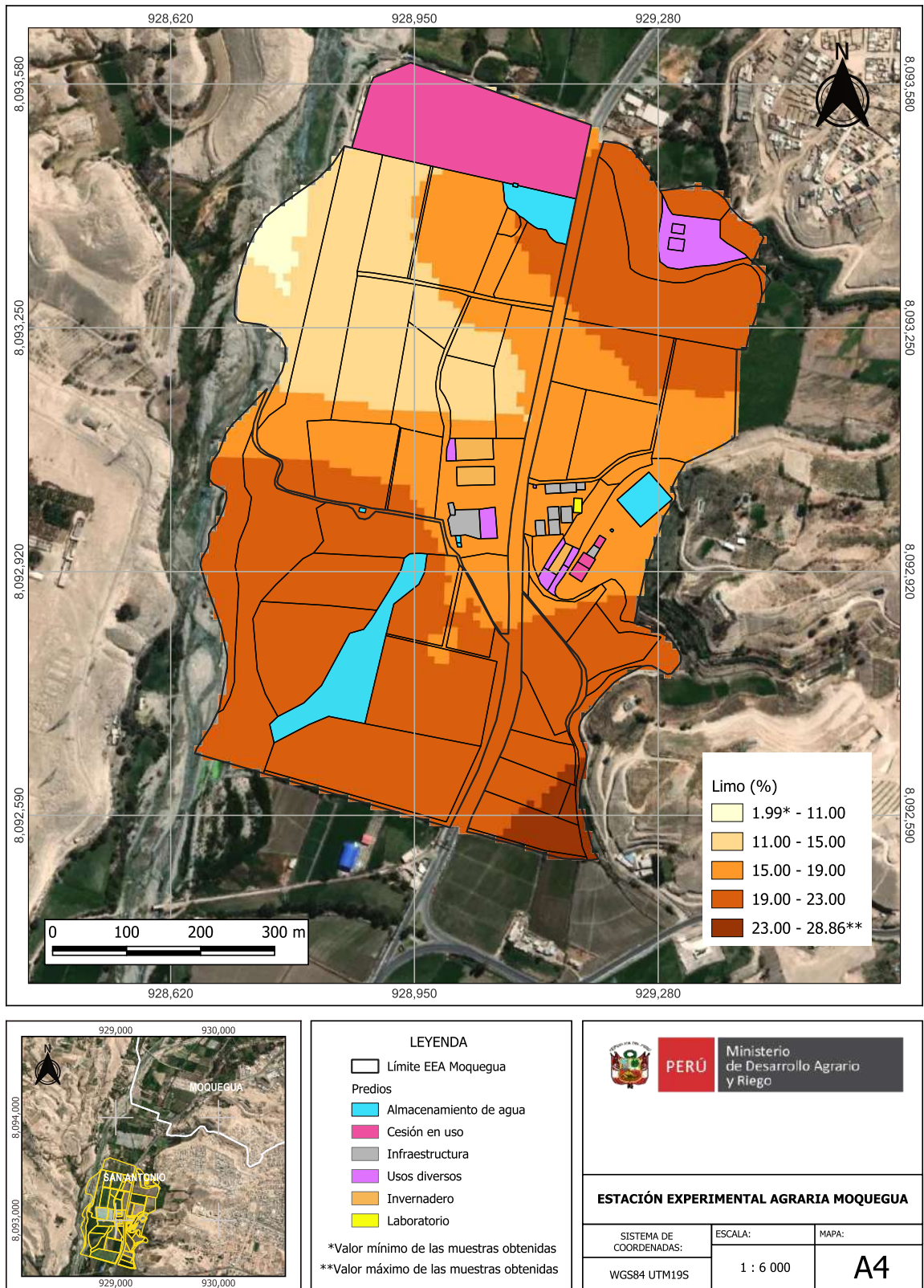


Figura 17. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

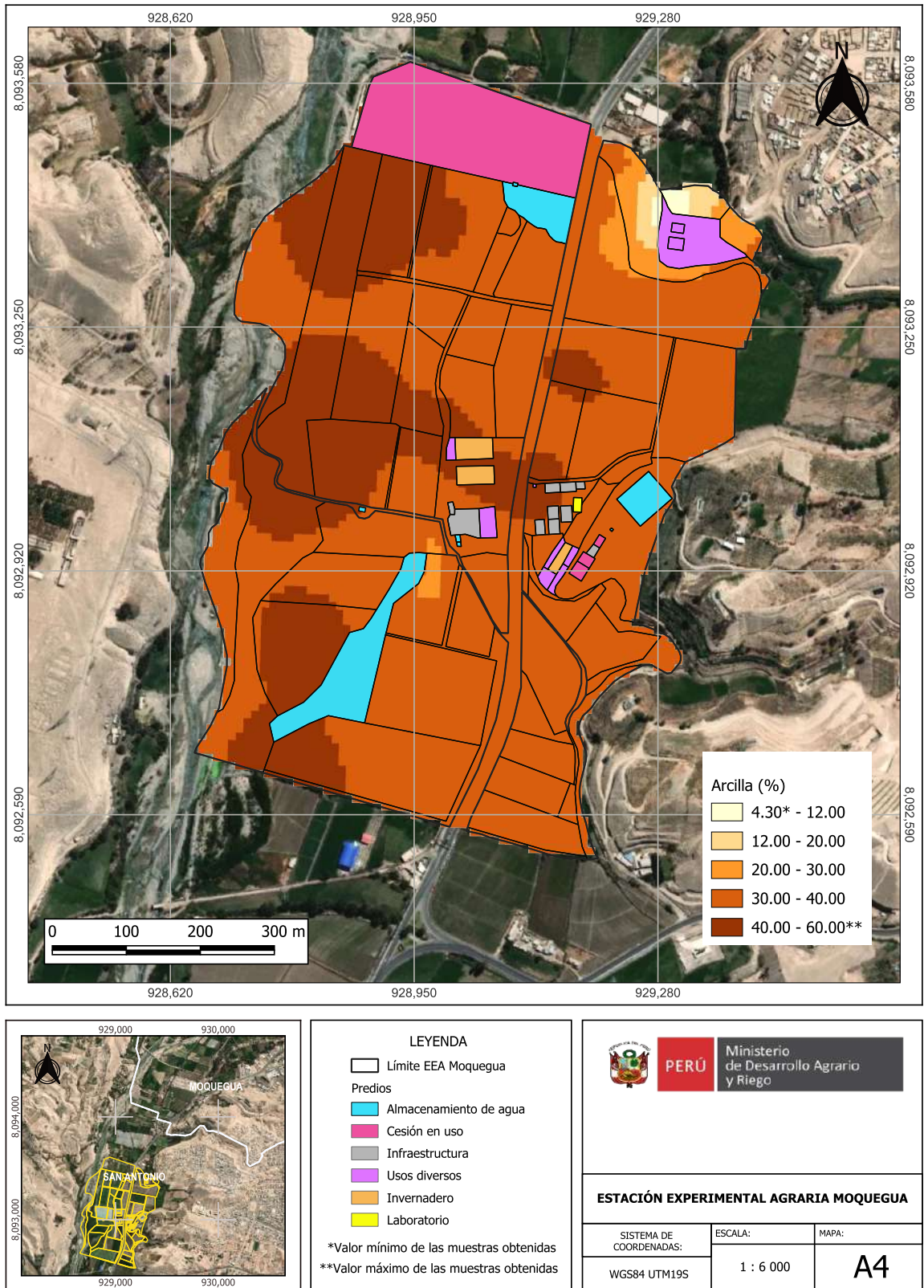


Figura 18. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

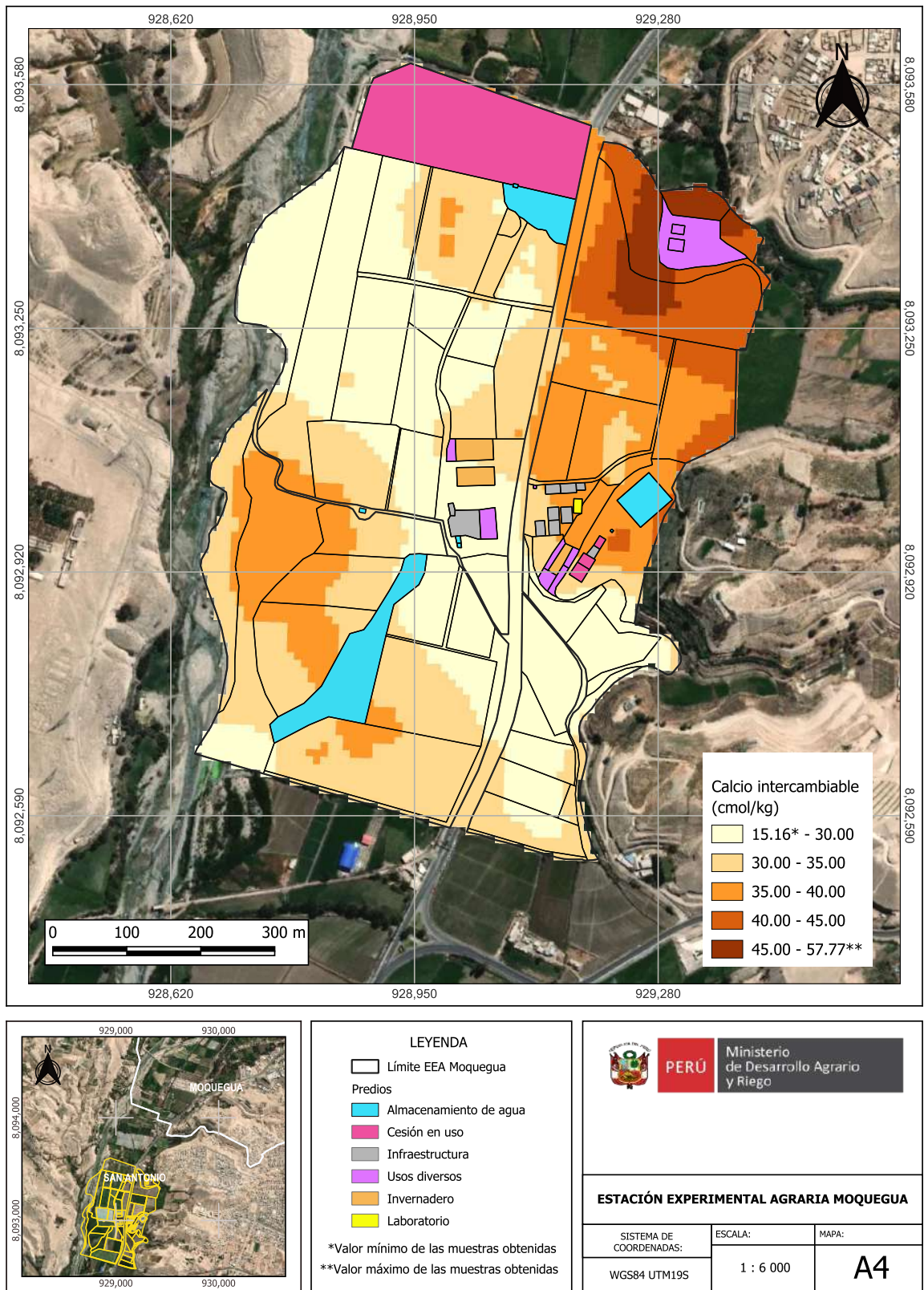


Figura 19. Mapa de variación espacial del calcio (Ca^{2+}) intercambiable

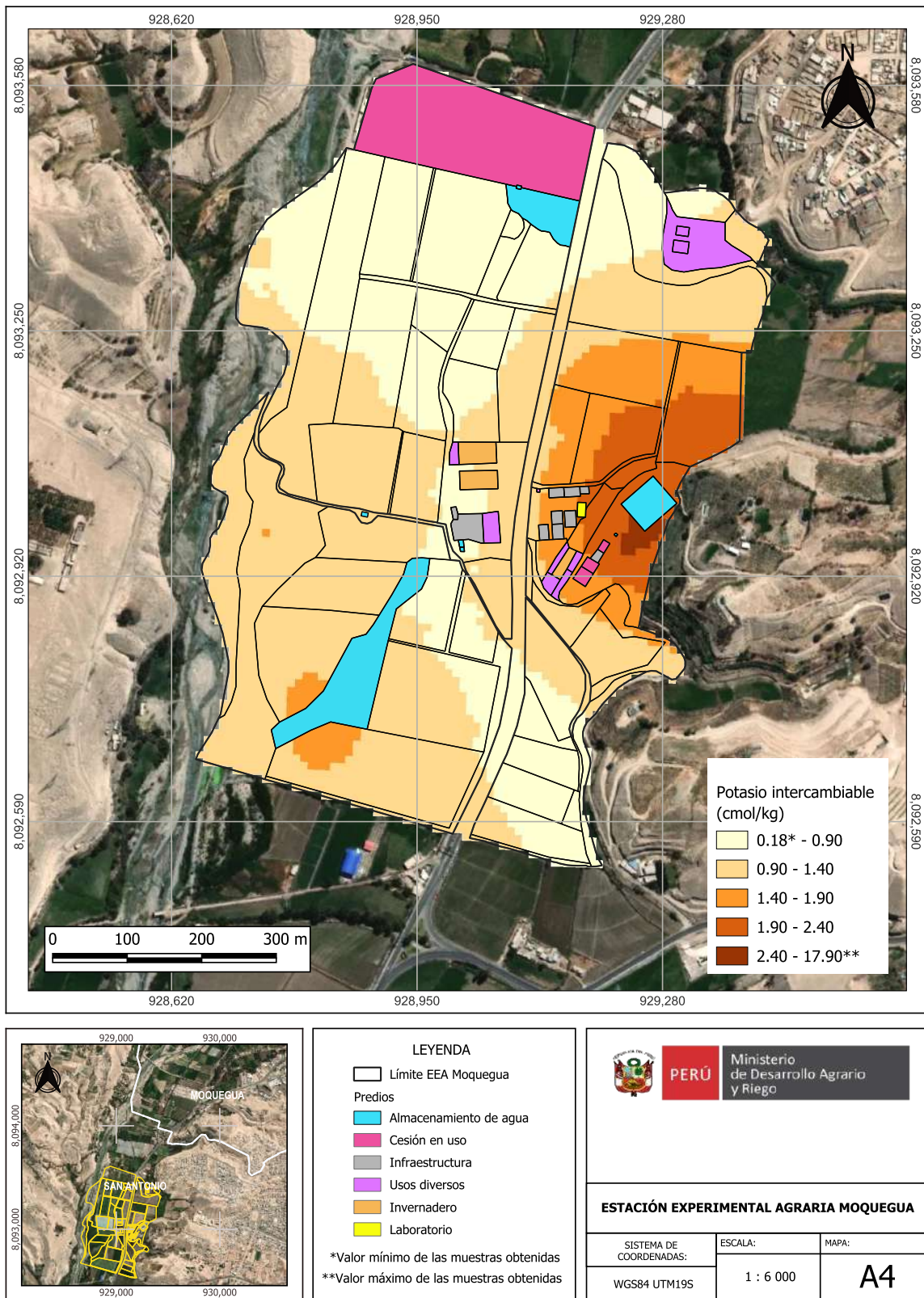


Figura 20. Mapa de variación espacial del potasio (K⁺) intercambiable

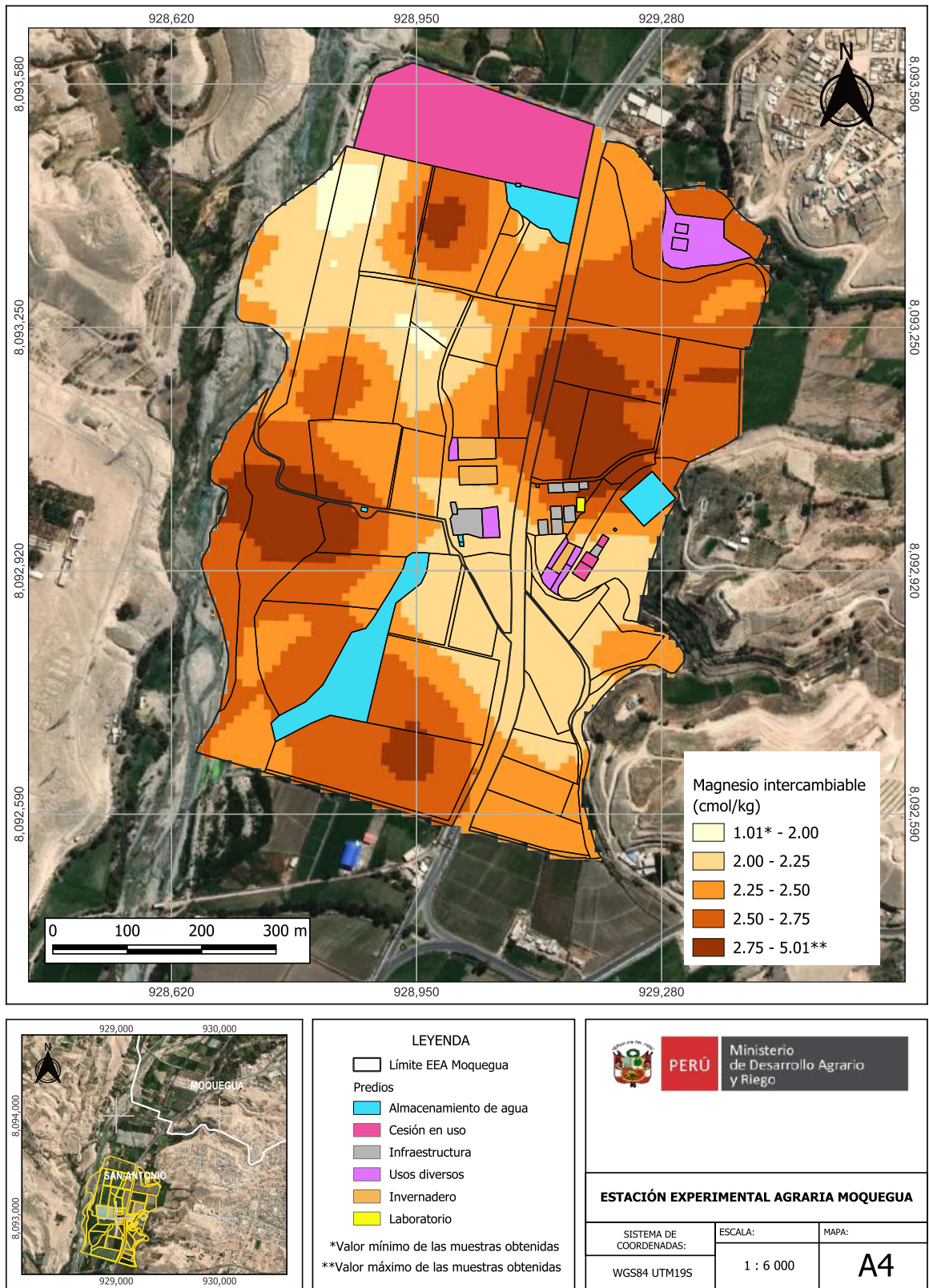


Figura 21. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

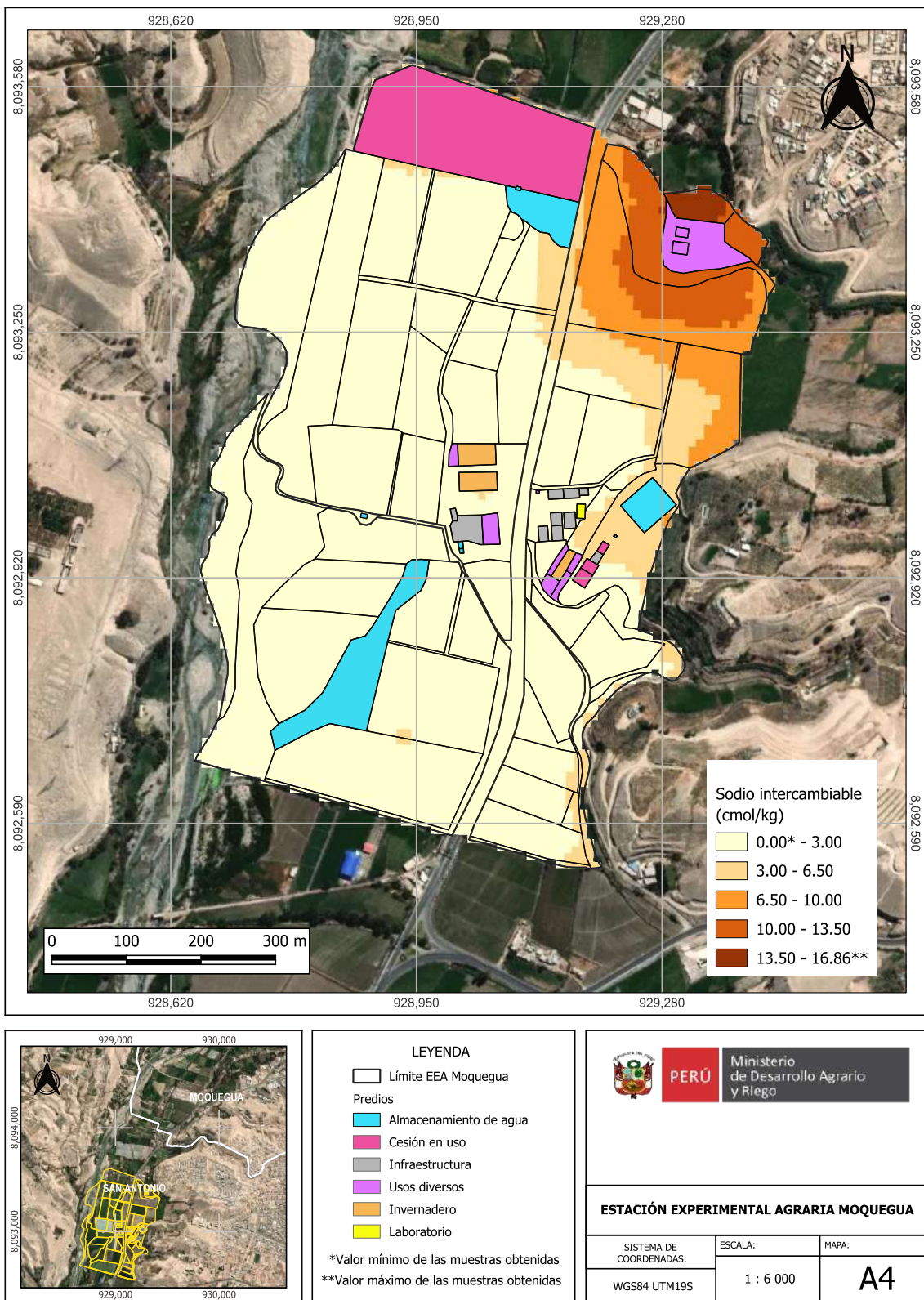


Figura 22. Mapa de variación espacial de sodio (Na⁺) intercambiable



inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

042202
FABRILAB S.A.S.
042202400105
AUTOMÁTICO MAGNÉTICO

ROKCO
E-Service
123 000
A-2014-03918

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

4.1. Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial del requerimiento de yeso agrícola en suelos sódicos

Los suelos de la EEA Moquegua son moderadamente calcáreos ($\text{CaCO}_3 = 4.07 \pm 1.36 \%$) y alcalinos ($\text{pH} = 7.74 \pm 0.31$), con niveles elevados de salinidad ($\text{CEe} = 9.17 \pm 8.37 \text{ dS m}^{-1}$). En conjunto, resultan limitantes químicos para cultivos predominantes en la región, como el palto y la vid, los cuales son altamente exigentes y sensibles a condiciones edáficas salinas y alcalinas. Asimismo, el carbonato de calcio (CaCO_3) presenta una estructura espacial moderada ($R^2 = 0.75$), mientras que el pH y la conductividad eléctrica en extracto de saturación ($R^2 = 0.24$ y 0.22 , respectivamente) evidenciaron una estructura espacial débil. En conjunto, estas variables permiten identificar tendencias espaciales generales útiles para la zonificación agronómica y la orientación del manejo de requerimiento de yeso agrícola y la tasa de fertilización de Fe, Mn y Zn.

El mapa de variación espacial del pH muestra zonas con tendencia a la acumulación de sales neutras a ligeramente alcalinas ($\text{pH} = 7.1-7.5$). No obstante, se observa una mayor superficie con pH entre 7.8 y 8.4, y zonas con problemas calcáreos por contenidos de CaCO_3 entre 1.82 y 8.94 % (Figura 15), donde predominan sales de carácter alcalino (carbonatos y bicarbonatos). Además, en los sectores con alta proporción de Na^+ en el complejo de cambio ($3.23 \pm 4.41 \text{ cmol kg}^{-1}$) constituye evidencia de la presencia de cloruros de sodio en condiciones neutras y de carbonatos de sodio en condiciones alcalinas.

También se observan valores de Ca^{2+} excesivamente elevados en el complejo de cambio ($33.37 \pm 8.86 \text{ cmol kg}^{-1}$). Esto se debe a que el uso del método estándar de extracción con acetato de amonio 1N ($\text{pH} 7.0$) sobreestima el Ca^{2+} , debido a la disolución parcial de carbonatos (CaCO_3) y sulfatos durante el ensayo. Esta reacción libera calcio no estrictamente intercambiable al extractante y sesga tanto la estimación del Ca absoluto como las magnitudes derivadas. Asimismo, subestima el riesgo de sodicidad de los suelos.

La teoría moderna del BCSR integra el análisis del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para la dosificación de yeso agrícola. De esta manera, el PSI medio fue de $6.25 \pm 6.40 \%$, con moderado riesgo de dispersión de arcillas y pérdida de estabilidad estructural del suelo, aunque subestimado. Asimismo, el mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable (Figura 23; $R^2 = 0.81$), permitió identificar 5 zonas con diferentes grados de severidad de la sodicidad del suelo: zona 1, sin problemas de sodicidad (PSI 0-4 %); zona 2, sodicidad moderada (PSI = 4-8 %); zona 3, sodicidad alta (8-12 %); zona 4, sodicidad muy alta (12-16); y zona 5, sodicidad excesiva (16-23.43 %).

De acuerdo con las recomendaciones sugeridas en la Figura 2, en este tipo de suelos se debe suministrar enmiendas azufradas, ya que facilita el movimiento de cationes a mayor profundidad en el perfil del suelo, principalmente sodio. Por este motivo, se realizará la estimación del requerimiento de yeso agrícola considerando la zona más crítica del mapa de variación espacial del Na^+ intercambiable (Figura 22, $R^2 = 0.85$), en donde hay niveles por encima de 10 cmol kg^{-1} , que representa valores aproximados de 20 % de Na^+ intercambiable. Para el cálculo se utilizará la fórmula 12, propuesta por Oster et al. (1999):

$$GR = 0.00086 \times BD \times D \times CECe \times (ESP_i - ESP_f) \quad \dots (12)$$

Donde:

GR: requerimiento de yeso agrícola ($t \text{ ha}^{-1}$).

BD: densidad aparente del suelo ($g \text{ cm}^{-3}$).

D: profundidad del suelo (cm).

CECe: capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol kg^{-1}), obtenido de la suma de las bases cambiables.

ESP_i: porcentaje de sodio intercambiable actual del suelo (%).

ESP_f: valor que se desea alcanzar (5 %) con la aplicación de yeso agrícola.

De esta manera, reemplazando en la fórmula se obtiene lo siguiente:

$$GR = 0.00086 \times 1.2 \times 30 \times 50 \times (20 - 5) = 23.22 \text{ t ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de yeso sería 23.22 t ha^{-1} para la zona con mayor peligro de sodicidad.

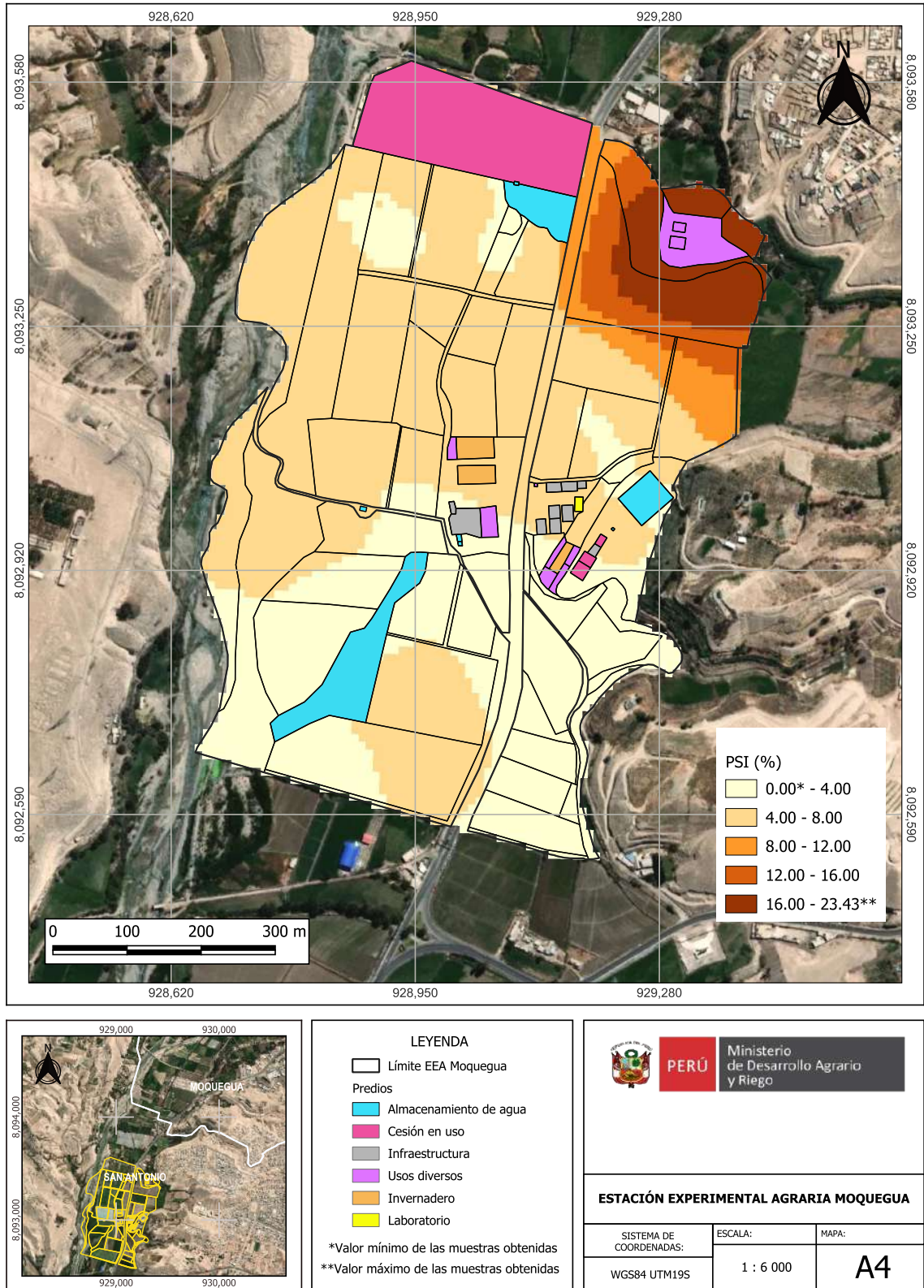


Figura 23. Mapa de variación espacial de porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Diagnóstico del P disponible del suelo y dosificación de la fertilización fosforada para palto

En el palto, niveles adecuados de P se asocian con un mayor desarrollo de raíces finas y vigor radicular, lo que incrementa la eficiencia de absorción de agua y nutrientes (Winer, et al., 1995). Además, el P desempeña diferentes roles determinantes, como favorecer la señalización de la transición floral y el cuajado de frutos de las plantas, dado que su disponibilidad durante la brotación primaveral y la etapa generativa estimula la biosíntesis de azúcares solubles y el transporte de asimilados hacia órganos reproductivos, asegurando un buen amarre y calidad del fruto (Dai et al., 2024; Fujita et al., 2003; Wu et al., 2021). Asimismo, a nivel de campo, la carencia de P se asocia con menor desarrollo vegetativo, necrosis foliar, defoliación temprana, pobre desarrollo de frutos y muerte regresiva de ramas (Committee Linking Entrepreneurship Agriculture Development [COLEAD], 2023). Por este motivo, es fundamental suministrar el requerimiento de fósforo del cultivo de palto en la etapa de brotación, floración y fructificación. Se tiene ensayos que han demostrado que cerca del 50 % del P que demanda el fruto se acumula durante su rápido crecimiento inicial, lo que resalta la importancia de asegurar disponibilidad en esos momentos clave (Rosecrance y Lovatt, 2004).

Desde el punto de vista agronómico, la eficiencia de uso del P en palto puede optimizarse con distintas estrategias. La fertilización localizada en la zona de raíces activas resulta más eficiente que aplicaciones al voleo, ya que el P es inmóvil en el suelo y tiende a fijarse rápidamente en los suelos calcáreos (Akhtar et al., 2016). Asimismo, el aporte de enmiendas orgánicas y fuentes de liberación lenta ayuda a mantener niveles moderados y sostenidos de P disponible, mejorando la absorción y reduciendo pérdidas por fijación (da Silva et al., 2024). Finalmente, la asociación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) es especialmente relevante en palto: estudios han demostrado que la inoculación con HMA incrementa la absorción de P y el crecimiento vegetativo bajo condiciones de baja disponibilidad de este nutriente, mientras que altas dosis de P pueden incluso ser perjudiciales para la simbiosis (Tamayo-Vélez y Osorio, 2016).

En conjunto, el fósforo en palto cumple un rol integrador en procesos energéticos, radicales y reproductivos. Asegurar su disponibilidad en momentos críticos del ciclo fenológico mediante manejo localizado, enmiendas orgánicas y fomento de micorrización constituye una estrategia coherente con la fisiología del cultivo y con las limitaciones edáficas de zonas calcáreas y salinas.

En los suelos de la EEA Moquegua, el fósforo disponible presentó una media de 40.77 ± 59.76 mg kg⁻¹ (CV = 146.58 %). Estos estadísticos reflejan una extrema heterogeneidad espacial y una distribución fuertemente asimétrica. En términos de manejo, esto implica la coexistencia de áreas con deficiencia de P y sectores con excesos, lo que refuerza la necesidad de un enfoque de fertilización sitio-específico. El modelado geoestadístico mostró que el P se ajustó a un modelo Gaussiano con un alcance espacial de aproximadamente 576.84 m. La validación cruzada mostró un RMSE = 0.69 mg kg⁻¹ y un R² = 0.19, lo que indica una estructura espacial y capacidad predictiva limitada. En la práctica, estos resultados sugieren que, si bien se identifican tendencias espaciales generales, una proporción importante de la variabilidad del fósforo ocurre a escala local. En consecuencia, se recomienda establecer la fertilización fosfatada sobre la base de rangos de concentración del nutriente, confirmados mediante muestreos de verificación en campo, aplicando ajustes de dosis únicamente entre zonas contrastantes (baja, media y alta disponibilidad), con el fin de optimizar el uso del fertilizante.

Para los cálculos de fertilización fosforada en el cultivo de palto, se tomará como referencia un nivel crítico de P-Olsen de 20 mg kg^{-1} y un rendimiento potencial de 30 t ha^{-1} . De esta manera, en las zonas con más de 20 mg kg^{-1} el nivel de fósforo es suficiente para el cultivo, por lo que no se espera respuesta a mayores niveles de la fertilización. En este sentido, se considerará el plan de fertilización en función al criterio de suficiencia (ver sección 2.1.2), para reponer lo extraído por la cosecha. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Primer 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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 30 \text{ t ha}^{-1} = 10.5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 30 \text{ t ha}^{-1} + 10.5 \text{ t ha}^{-1} = 40.5 \text{ t ha}^{-1}$$

Tercer paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 40.5 \text{ t ha}^{-1} = 42.93 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería 189.06 kg de fosfato monoamónico (52 % de P_2O_5) por hectárea. Con esta dosis anual de fertilizante, se logra reponer el P extraído por el rendimiento producido en el sistema productivo del palto en la EEA Moquegua.

4.3. El pH del suelo

Los suelos de la EEA Moquegua son alcalinos (ver Figura 9), de los cuales el 60 % presentan un pH superior a 7.7. En esta condición generalmente disminuye la biodisponibilidad de Fe, Mn, Cu y Zn en el suelo. En el caso del molibdeno (Mo), su disponibilidad aumenta con el incremento del pH del suelo, y en el caso del boro (B) inicialmente su concentración disminuye, pero a un pH > 8.5 comienza a elevarse.

La producción de cultivos en estos suelos alcalinos con bajo contenido de materia orgánica (1.6 %) da lugar a deficiencias de micronutrientes. Los indicadores geoestadísticos obtenidos para el pH del suelo mostraron un valor de *Nugget* (C_0) bajo (0.07), lo que sugiere una baja variabilidad a microescala, es decir, los valores de pH no cambian de forma significativa a distancias muy cortas. Asimismo, el valor del *Sill* ($C_0 + C$) fue de 0.15, confirmando que la variabilidad del pH del suelo sigue siendo baja incluso a mayor escala espacial, lo cual es consistente con una distribución homogénea del pH en el área de estudio. El modelo presentó un bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.24$) y un error cuadrático medio reducido ($\text{RMSE} \pm 0.27$), lo que refleja una capacidad predictiva limitada, pero suficiente para identificar tendencias espaciales generales.



5. Referencias bibliográficas

- Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., y Hernandez, V. E. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3701-3707. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7555>
- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessaraki (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, 22(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 1-10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Buresh, R.J., Smithson, P.C., y Hellums, D.T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- 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/>
- Committee Linking Entrepreneurship Agriculture Development (2023). *Good practice guide on the Avocado Value Chain*. <https://fpeak.org/wp-content/uploads/2023/05/Good-Pratice-Guide-Avocado-Final-version.pdf>

- Cruz-Luis, J. A., Ortiz-Morera, N. C., Quispe-Torres, D. R., Atalaya-Lopez, J. S., Macavilca-Villar, P. M., Ramírez-Aparicio, J. A., Salinas-Rivera, J. L., Escobar-Cuadros, F., Carbajal-Llosa, C. M., Olivarez-Rivera, E. L., Casaretto-Castagnino, D., y Ganoza-Roncal, J. J. (2025). *Atlas de las Estaciones Experimentales Agrarias del INIA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2763>
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20995>
- Dai, S., Chen, H., Shi, Y., Xiao, X., Xu, L., Qin, C., Zhu, Y., Yi, K., Lei, M., y Zeng, H. (2024). PHOSPHATE1-mediated phosphate translocation from roots to shoots regulates floral transition in plants. *Journal of Experimental Botany*, 75(16), 5054-5075. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae222>
- da Silva, R. W., Rodrigues, H. R., Paquini, L., Andrade, F., de Sá Mendonça, E., Passos, O. J., Profeti, D., Profeti, P., y Ribeiro, R. (2024). Organophosphate fertilizers based on biochars and phosphorus availability in the soil. *ACS Agricultural Science & Technology*, 4(10), 1054-1062. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.4c00368>
- Díaz-Chuquizuta, H., Arévalo-Aranda, Y., Samaniego-Puente, J. C., Siquiera-Bahia, R. de C., y Solórzano-Acosta, R. A. (2025). *Manual para la fertilización del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de la selva peruana*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2687>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos* (1.ª ed.). International Plant Nutrition Institute. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Fujita, K., Okada, M., Lei, K., Ito, J., Ohkura, K., Adu-Gyamfi, J. J., y Mohapatra, P. K. (2003). Effect of P-deficiency on photoassimilate partitioning and rhythmic changes in fruit and stem diameter of tomato (*Lycopersicon esculentum*) during fruit growth. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2519-2528. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg273>
- 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., & 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.
- Hartemink, A.E., y Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant Soil* 486, 209-215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

- Halstead, R. L., MacLean, A. J., y Nielsen, K. F. (1958). Ca: Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Canadian Journal of Soil Science*, 38(2), 85-93. <https://doi.org/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality - Determination of specific electrical conductivity*.
- International Organization for Standardization. (1995). *Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method*.
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259-265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Labrador, J. (2008). *Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica* (Manual técnico). Sociedad Española de Agricultura Ecológica. <https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/01/manual-suelos-jlabrador.pdf>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/08/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). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Oster, J. D., Shainberg, I., & 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.
- 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>

- Reza, S. K., Nayak, D.C., Mukhopadhyay, S., Chattopadhyay, T., y Singh, S.K. (2017) Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(11), 1489-1498, <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1296134>
- Rosecrance, R., y Lovatt, C. J. (2004). *Seasonal patterns of nutrient uptake and partitioning as a function of crop load of 'Hass' avocado*. (Documento técnico). California Department of Food and Agriculture https://lovattresearch.ucr.edu/sites/default/files/2020-01/techsyp_lovatt_2005b.pdf
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- 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>
- Tamayo-Velez, A., y Osorio, N. W. (2017). Co-inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing fungus promotes the plant growth and phosphate uptake of avocado plantlets in a nursery. *Botany*, 95(5), 539-545. [dx.doi.org/10.1139/cjb-2016-0224](https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0224)
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Winer, L., Reuveni, B., Bar, Y., Haas, J. H., y Zveibil, A. (1995). Influence of autumn fertilization with nitrogen and phosphorus on root activity and development in avocado. *Proceedings of the World Avocado Congress III* (pp. 172-180). https://www.avocadosource.com/WAC3/wac3_p172.pdf
- Wu, S., Li, M., Zhang, C., Tan, Q., Yang, X., Sun, X., Pan, Z., Deng, X., y Hu, C. (2021). Effects of phosphorus on fruit soluble sugar and citric acid accumulations in citrus. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.015>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Thesis submitted to obtain the degree of Master of Science in Agronomy and Soil Science]. University of Hawai'i at Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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



Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios



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



Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-246-9



9 789972 442469



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru