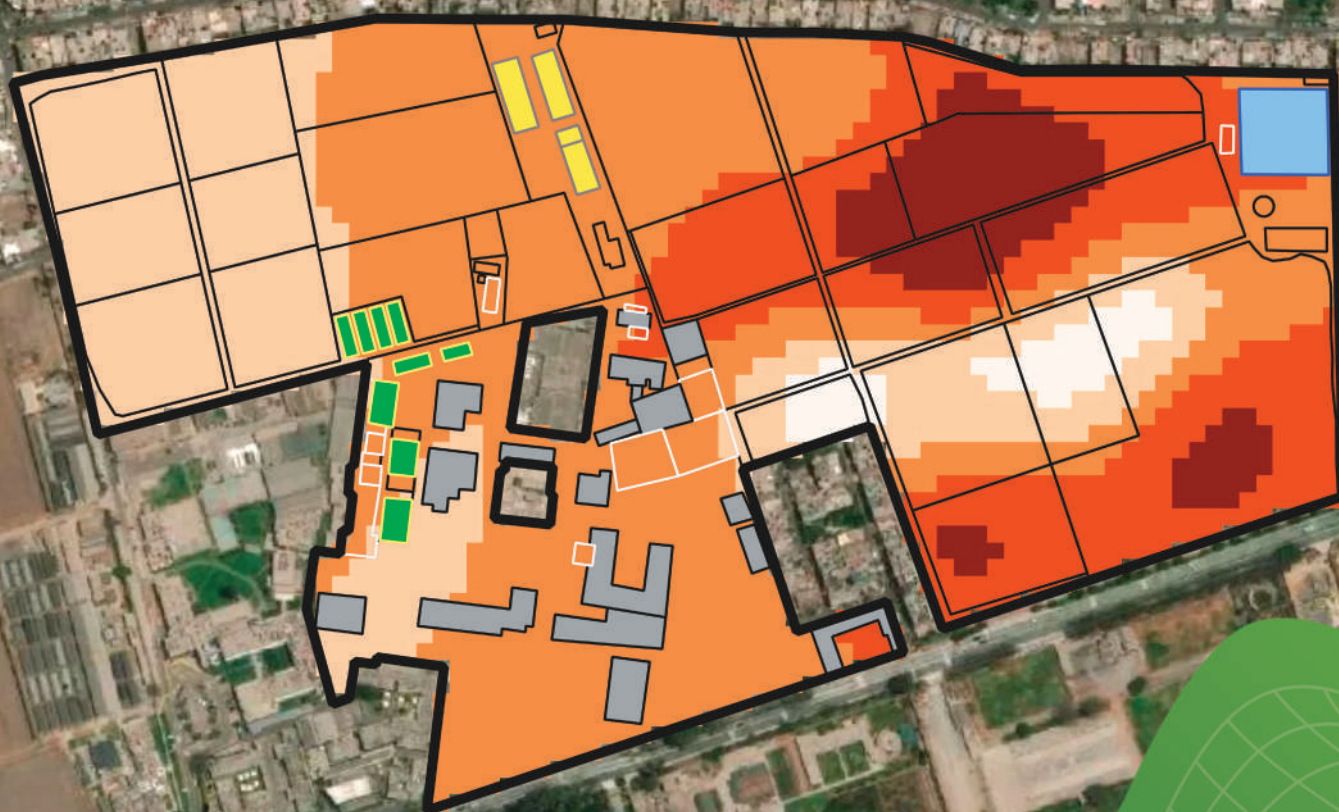


Variación espacial de la fertilidad del suelo en el Centro Experimental La Molina



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 el Centro Experimental La Molina



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA MOLINA

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:

978-9972-44-241-4

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° 2026-01779

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Remon, Rigel A. Llerena-Arroyo, Albert E. Fernandez-Puquio, Wendy E. Pérez-Porras, Nilton A. Hermoza-Ayme, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos 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 del CELM	25
3.1. Ubicación del CELM	25
3.2. Muestreo estratificado del suelo	26
3.2.1. Determinación de los puntos de muestreo	27
3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados	28
3.3. Análisis de suelos	29
3.4. Resultados de los análisis de suelos	30
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	32
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	33
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	34
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	34
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	34
3.7.3. Validación cruzada	34
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	38
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en el CELM	55
4.1. Índice de saturación de bases catiónicas	55
4.1.1. Variación espacial del calcio intercambiable y corrección de desequilibrios catiónicos	55
4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	59
4.2.1. Variación espacial del requerimiento de fertilización potásica para el cultivo de palto	59
4.2.2. Requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cultivo de palto	62
4.3. El pH del suelo	64
4.3.1. Variación espacial del manganeso disponible del suelo y su relación con el pH	64
5. Referencias bibliográficas	69



Presentación

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

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

La variabilidad espacial de la fertilidad del suelo influye de manera directa en la productividad agrícola, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas productivos, particularmente en entornos con alta heterogeneidad ambiental. Los métodos tradicionales de evaluación, sustentados en promedios o mediciones puntuales, no logran representar adecuadamente dicha variabilidad, lo que restringe la formulación de decisiones agronómicas precisas. En este contexto, el uso de modelos geoestadísticos integrados con sistemas de información geográfica (SIG) facilita la identificación y el análisis de los patrones espaciales de las propiedades edáficas, generando información técnica relevante para el manejo sitio específico, la conservación del recurso suelo y la planificación racional de la fertilización.

El presente documento sistematiza y describe los resultados del muestreo, análisis e interpretación de las propiedades del suelo en el Centro Experimental La Molina. Asimismo, detalla el proceso de análisis geoespacial, metodología replicable en otros campos agrícolas, para caracterizar la variabilidad de la fertilidad, identificar problemas como salinidad, sodificación o deficiencia de nutrientes, y proponer prácticas de manejo específicas. Esta información permite delimitar zonas de manejo homogéneas, optimizar el uso de fertilizantes y tomar decisiones agrícolas más precisas y sostenibles.

M. Sc. Jorge Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



1. Introducción

Los suelos de la costa central del Perú presentan condiciones edáficas particulares, derivadas de su origen aluvial y de la influencia de un régimen climático árido (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Esta combinación condiciona la disponibilidad hídrica, la dinámica de sales y la respuesta de los sistemas de cultivo, lo que genera limitaciones para la agricultura intensiva cuando no se aplican prácticas de manejo adecuadas (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017).

En el Centro Experimental La Molina (CELM) —con suelos Fluvisol éútrico y Regosol éútrico desarrollados sobre sedimentos fluviales recientes, característicos de la costa árida peruana— se registra una baja acumulación de materia orgánica y una textura franco-arenosa predominante (INRENA, 1996). Estas condiciones crean una capacidad limitada de retención de agua y nutrientes, favoreciendo procesos de lixiviación bajo esquemas de riego intensivo y generando gradientes espaciales de fertilidad que determinan respuestas agronómicas heterogéneas entre zonas (Alghamdi et al., 2024; Zhu et al., 2024). Estos suelos áridos presentan variaciones locales en el pH, en la saturación de bases intercambiables y en la presencia de áreas con elevada conductividad eléctrica, lo que evidencia la coexistencia de problemas edáficos complementarios: deficiencias puntuales de micronutrientes en sectores alcalinos, desequilibrios catiónicos que afectan la capacidad de intercambio y procesos incipientes de salinización o sodificación, asociados tanto a la calidad del agua de riego como a las prácticas de manejo (Alloway, 2008; Gamboa et al., 2020; Ayers y Westcot, 1985). Estas interacciones fisicoquímicas generan efectos sinérgicos sobre la estructura del suelo, la porosidad y la disponibilidad hídrica útil en la zona radicular, lo que reduce la resiliencia del recurso edáfico frente a condiciones de sequía y manejo intensivo (FAO, 2017; Alghamdi et al., 2024).

La evidencia científica indica que, frente a mosaicos edáficos como los observados en los suelos de la costa peruana, es imprescindible adoptar una estrategia integrada que combine: (i) la caracterización detallada y la cartografía de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas, mediante métodos de mapeo digital y análisis geoestadístico; (ii) el diagnóstico de los principales factores limitantes (materia orgánica, fósforo, potasio, salinidad y desequilibrios en el intercambio catiónico); y (iii) el diseño de prácticas de manejo diferenciado —como la fertilización variable, la aplicación localizada de enmiendas orgánicas, el manejo del riego y el drenaje, y las medidas de control de sales— orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de insumos y la sostenibilidad de los suelos (Heuvelink y Webster, 2022; Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019; McBratney et al., 2003; FAO, 2017).

El presente documento tiene como objetivo proveer las herramientas técnicas y cartográficas para implementar un manejo diferencial del suelo, orientado a reducir pérdidas por lixiviación y procesos de salinización; optimizar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes; incrementar la resiliencia y competitividad del sistema productivo frente a desafíos ambientales y económicos.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

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

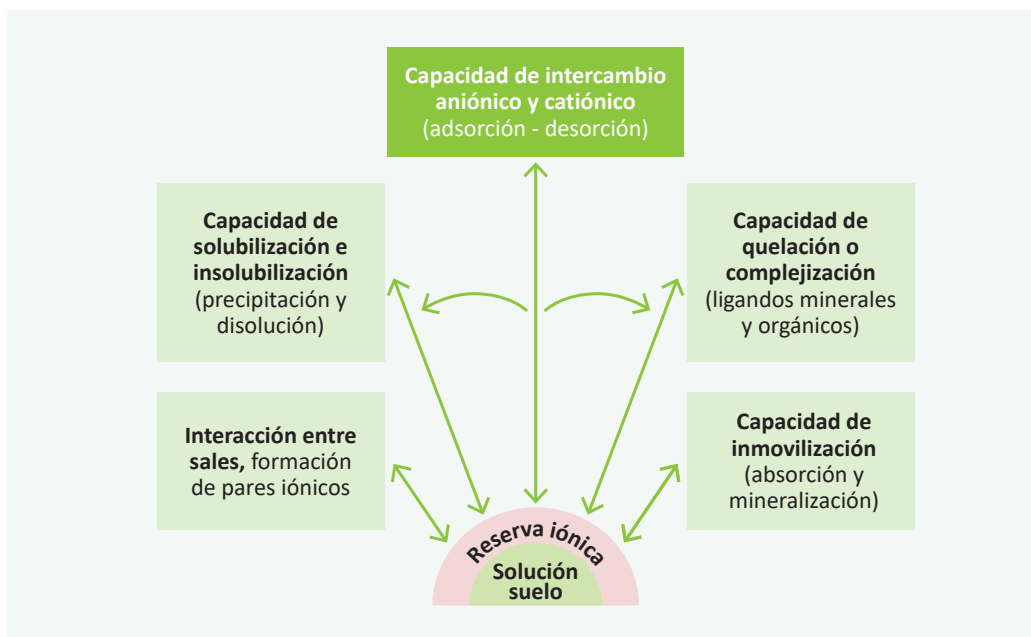


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

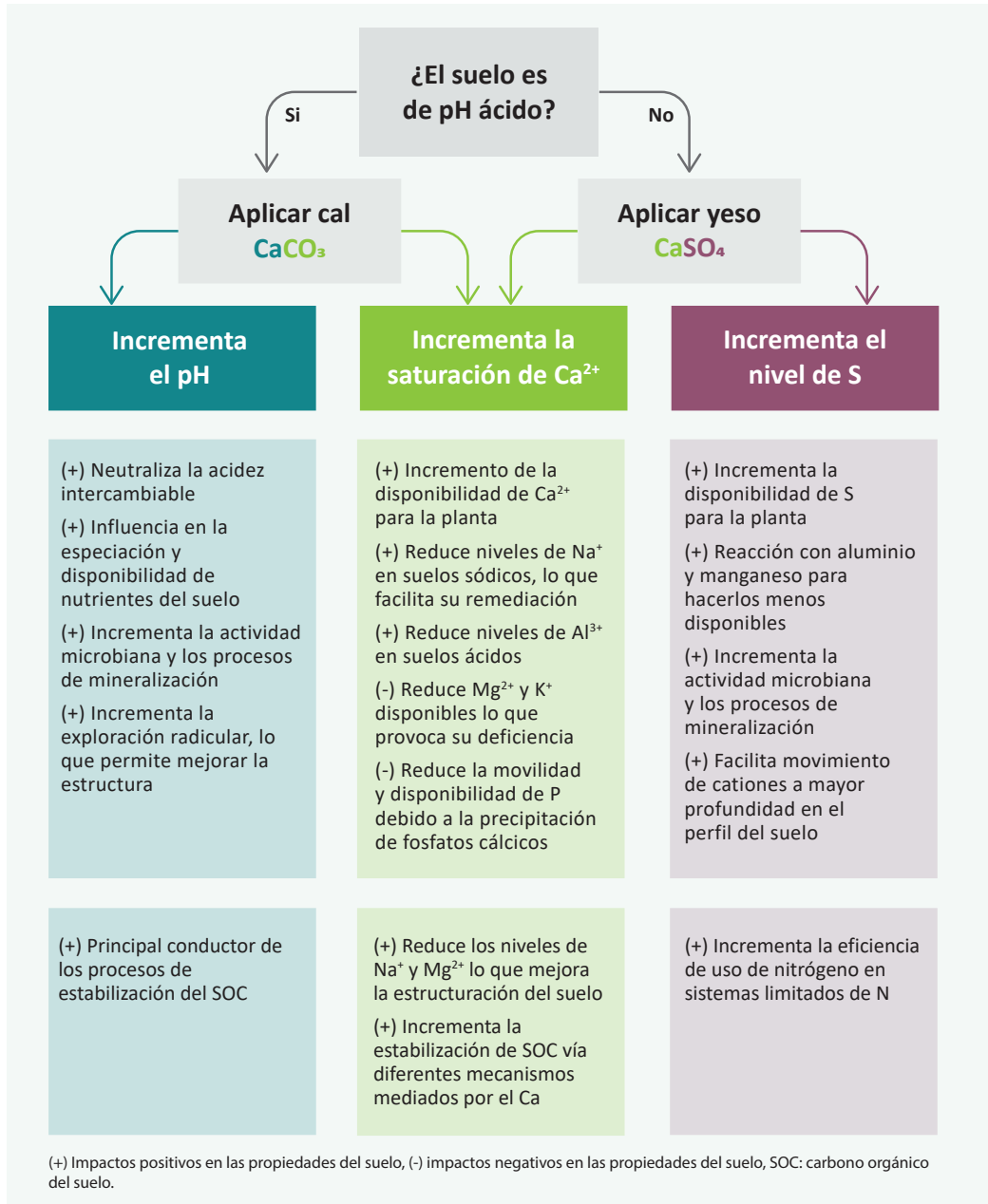


Figura 2. Criterios para el uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

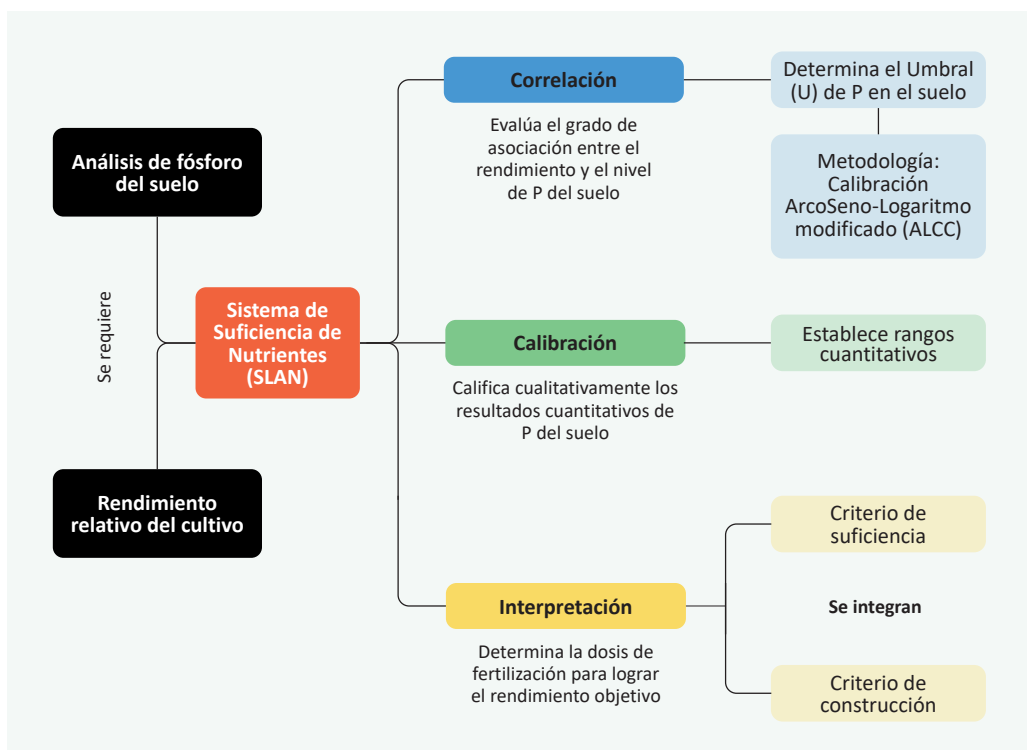


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

Además, para calcular los requerimientos de mantenimiento y 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 70 %.

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

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

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

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

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 21 \text{ t ha}^{-1} = 7.35 \text{ t ha}^{-1}$$

Además de los 21 t ha⁻¹ de producción, el cultivo genera 7.35 t ha⁻¹ de biomasa en raíces y brotes, lo que debe considerarse en el balance nutricional.

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

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 7.35 \text{ t ha}^{-1} + 21 \text{ t ha}^{-1} = 28.35 \text{ t ha}^{-1}$$

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 28.35 \text{ t ha}^{-1} = 30.05 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 30.05 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 28.35 t ha⁻¹, el cual está conformado por 7.35 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 21 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

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

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, 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 40 %.

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

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

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 1.06 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 16.2 \text{ t ha}^{-1} = 17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

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

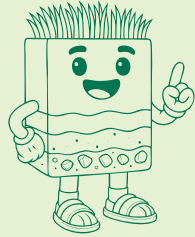
$$\text{Requerimiento de P} = \frac{17.17 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 57.2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de palto es 57.2 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterios de mantenimiento y construcción)

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

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



Nota:

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

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

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

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

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 6 \text{ t ha}^{-1} = 2.1 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 2.1 \text{ t ha}^{-1} + 6 \text{ t ha}^{-1} = 8.1 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 8.1 \text{ t ha}^{-1} = 8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{8.58 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 42.9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

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

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

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

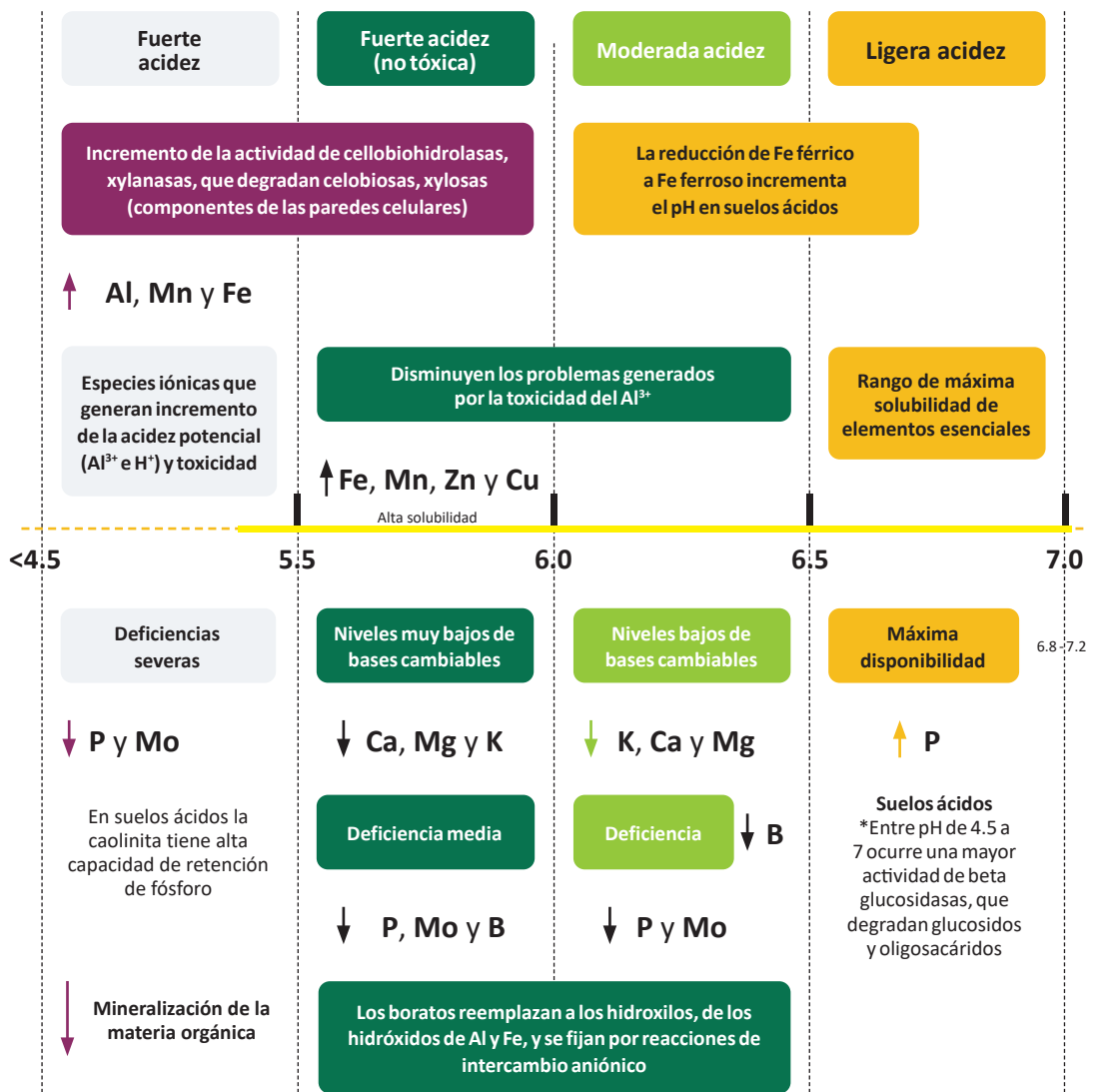
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 42.93 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 56.4 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de palto es 56.4 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).



Incrementa la inhibición del crecimiento longitudinal y ramificación de raíces, absorción de agua y daño de los transportadores ATPasa para la absorción activa de potasio

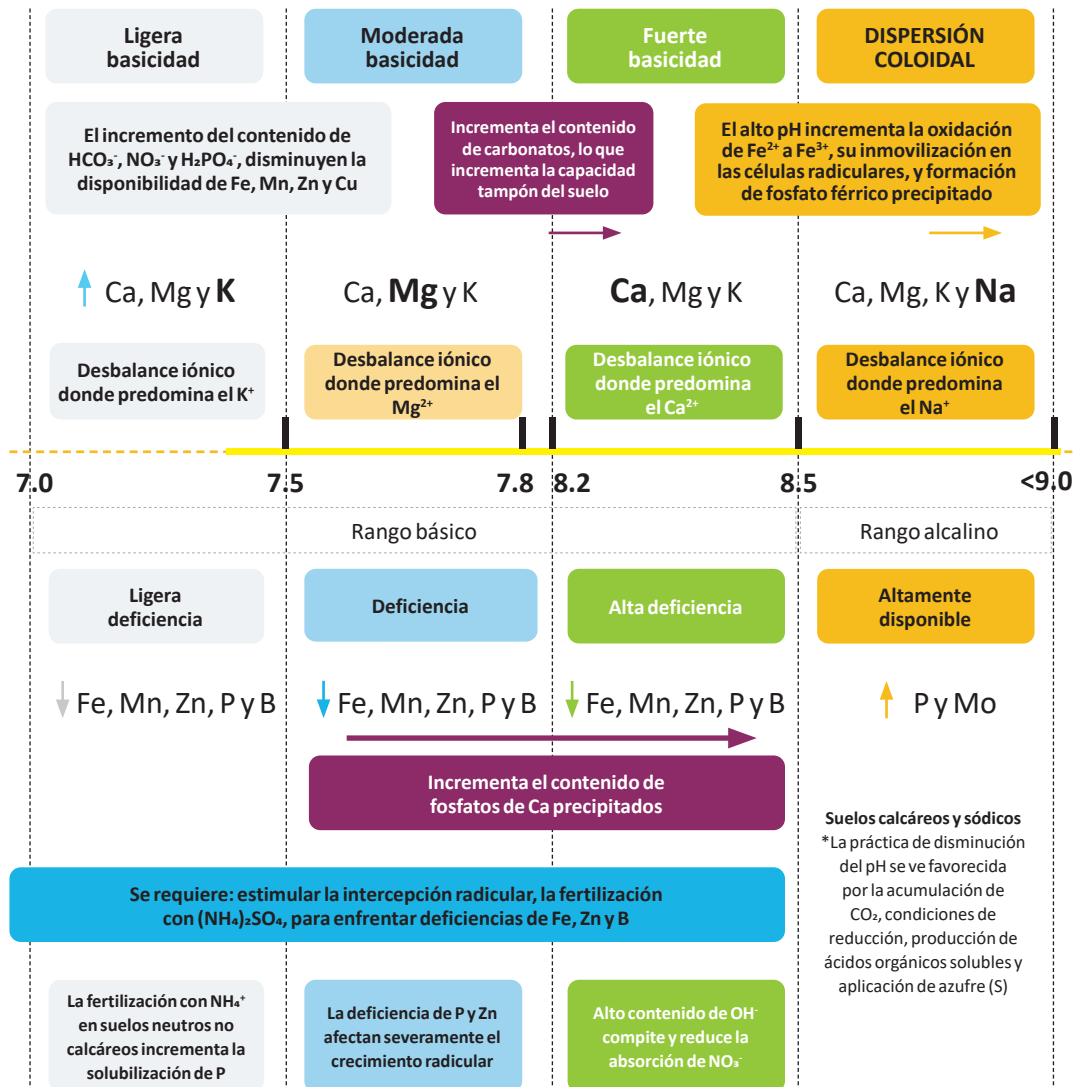


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

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 del CELM

3.1. Ubicación del CELM

El Centro Experimental La Molina (CELM) presenta suelos de tipo Fluvisol éútrico y Regosol éútrico, originados a partir de sedimentos fluviales recientes, y se caracteriza por un bajo contenido de materia orgánica con valores menores al 1 % (INRENA, 1996). Cuenta con una extensión de 44.50 ha, siendo los cultivos priorizados, *Passiflora edulis* (maracuyá), *Phaseolus vulgaris* (frijol), *Zea mays* (maíz), *Solanum tuberosum* (papa), *Persea americana* (palto), *Pouteria lucuma* (lúcumo), entre otros.

En el centro experimental se realiza investigación, valoración, conservación, producción de material genético de plantas y animales, además de brindar asistencias técnicas y otros servicios para los agricultores de la región Lima. El CELM se encuentra en el distrito de La Molina, provincia de Lima, departamento de Lima (Figura 5), en la región Costa o Chala a 243 m s. n. m. con precipitaciones anuales de hasta 30 mm y temperaturas medias anuales que varían entre los 17 a 24 °C (Cruz-Luis et al., 2025).

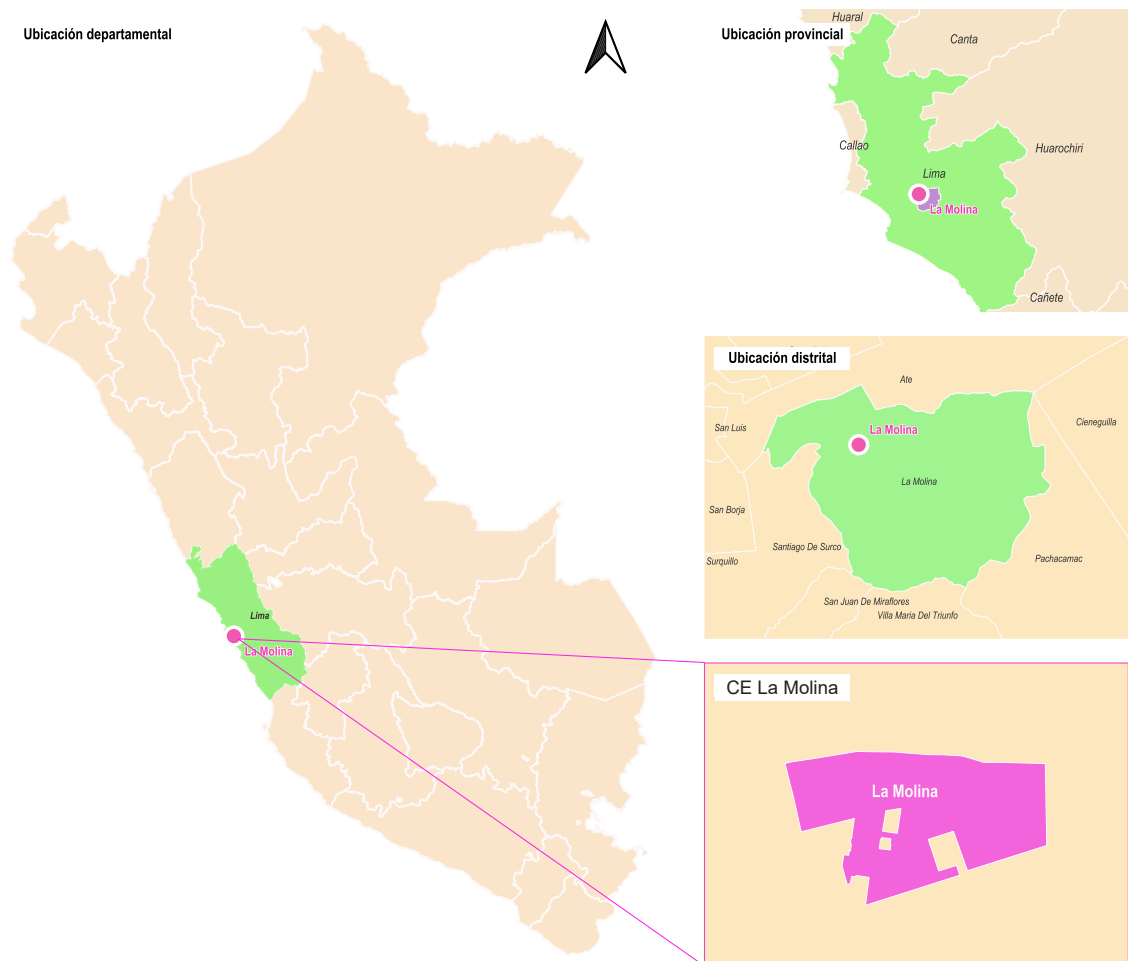


Figura 5. Ubicación del CELM

3.2. Muestreo estratificado del suelo

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

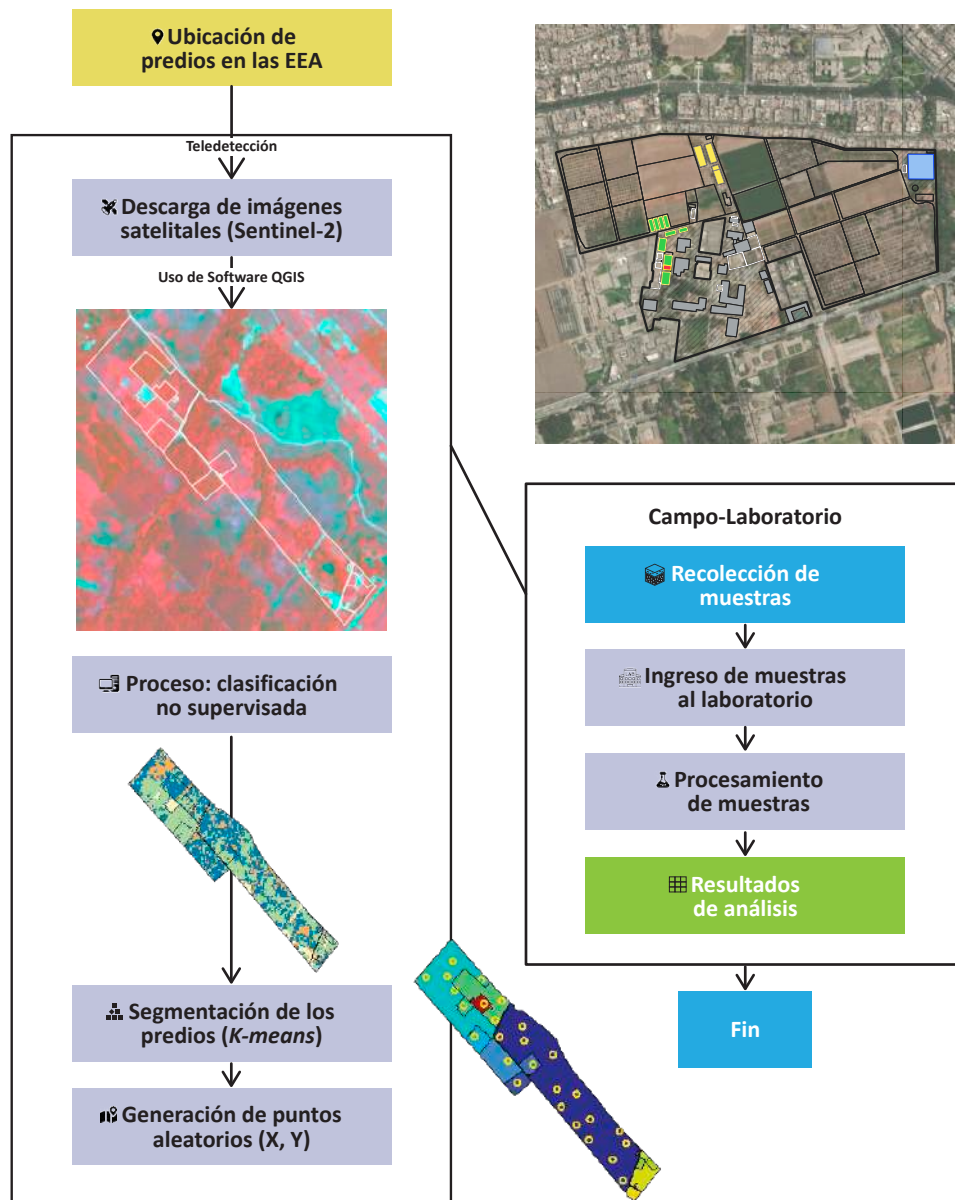


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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

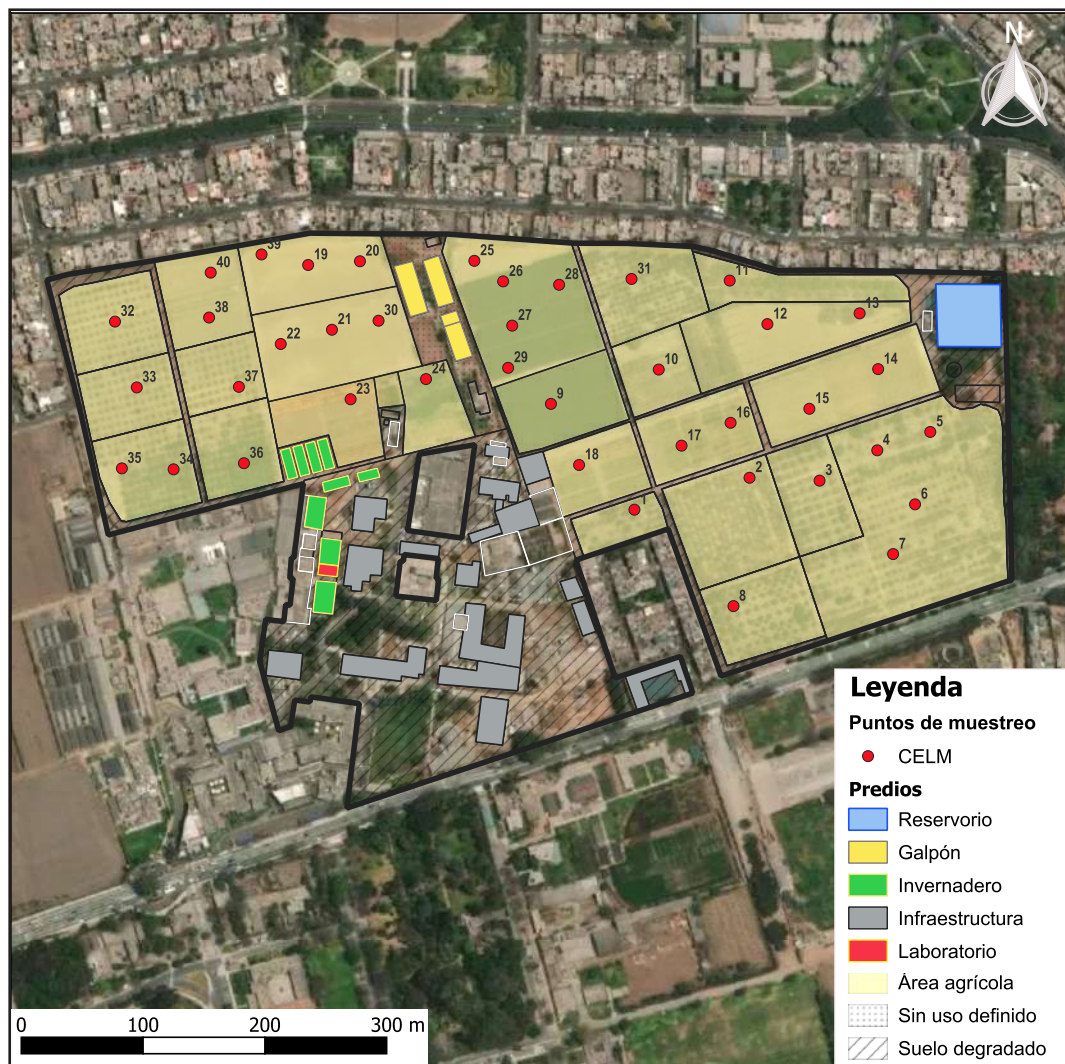


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en el CELM

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Una vez identificadas las coordenadas de los 40 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, colocando entre estas la cartilla de identificación.



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

3.3. Análisis de suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelos, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliars del CELM para su posterior 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)
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 del análisis de suelos del CELM muestran que, en promedio, los suelos presentan una textura franco-arenosa (56.91 % arena, 25.83 % limo y 17.27 % arcilla), con variabilidad baja a moderada (CV entre 9.8-22.8 %). La distribución de arena es relativamente simétrica y sesgada hacia valores bajos (*skewness* = -0.66), mientras que limo y arcilla muestran una ligera asimetría positiva. Esta condición textural favorece la aireación y drenaje del suelo, aunque puede limitar la retención de agua y nutrientes en comparación con suelos más finos.

El pH es cercano a la neutralidad (6.98 ± 0.48 , CV = 6.9 %), aunque con valores extremos que alcanzan 9.66 y una fuerte asimetría positiva (*skewness* = 4.01). Esto indica la presencia de sectores puntuales con tendencia a la alcalinidad, posiblemente vinculados a microambientes con acumulación de sales o carbonatos. Sin embargo, en promedio, el suelo mantiene condiciones químicas adecuadas para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes.

La conductividad eléctrica ($4.22 \text{ dS m}^{-1} \pm 2.80$) evidencia un nivel de salinidad moderado, con alta variabilidad (CV = 66.46 %) y valores extremos de hasta 11.21 dS m^{-1} . Esto sugiere la coexistencia de áreas sin limitaciones severas y sectores con problemas de salinidad que podrían afectar el rendimiento de cultivos sensibles.

El contenido de materia orgánica es bajo ($1.62 \% \pm 0.33$, CV = 20.37 %), lo cual refleja una fertilidad orgánica limitada, acorde con la intensidad de uso agrícola. Los carbonatos de calcio son prácticamente inexistentes (0.06 % en promedio, aunque con alta variabilidad relativa), lo que confirma que la alcalinidad observada en algunos puntos no está asociada a acumulaciones significativas de CaCO_3 .

En el complejo de intercambio catiónico, el calcio ($6.45 \text{ cmol kg}^{-1}$) predomina claramente, con niveles estables (CV = 3.04 %), mientras que el magnesio ($1.91 \text{ cmol kg}^{-1}$) y el potasio intercambiable ($0.41 \text{ cmol kg}^{-1}$) se encuentran en rangos adecuados, pero con mayor dispersión. El sodio, aunque bajo en promedio ($0.60 \text{ cmol kg}^{-1}$), muestra alta variabilidad (CV = 40.95 %) y valores extremos de hasta $1.59 \text{ cmol kg}^{-1}$, lo cual plantea riesgo de sodicidad localizada. El CIC efectivo ($9.37 \text{ cmol kg}^{-1}$) indica una capacidad de retención de nutrientes moderada, con saturación de bases dominada por el calcio (PCI = 68.86 %).

En cuanto a los micronutrientes, los contenidos de hierro (11.62 mg kg^{-1} , CV = 51.31 %), zinc (13.47 mg kg^{-1} , CV = 47.48 %) y cobre (3.19 mg kg^{-1} , CV = 56.28 %) muestran una alta variabilidad, con valores extremos que evidencian la influencia de fertilizaciones diferenciales o heterogeneidad edáfica. El manganeso, en cambio, es bajo y relativamente uniforme (1.21 mg kg^{-1} , CV = 15.88 %).

Respecto a los nutrientes disponibles, el fósforo ($14.12 \text{ mg kg}^{-1} \pm 8.98$, CV = 63.59 %) presenta alta variabilidad y fuerte asimetría positiva (*skewness* = 1.44), con presencia de sectores enriquecidos por aplicaciones puntuales. El potasio disponible es elevado en promedio ($159.61 \text{ mg kg}^{-1} \pm 82.44$, CV = 51.65 %), también con alta dispersión y valores extremos de hasta $378.27 \text{ mg kg}^{-1}$.

En conjunto, los suelos del CELM se caracterizan por una textura arenosa con limitada capacidad de retención, un pH cercano a la neutralidad, pero con sectores alcalinos, salinidad moderada a alta en áreas específicas, baja materia orgánica y una fertilidad química contrastante, con deficiencia en nitrógeno y materia orgánica, pero contenidos variables de fósforo, potasio y micronutrientes. Estas condiciones sugieren la necesidad de un manejo diferenciado por ambientes, que considere: incorporación sistemática de materia orgánica, control de salinidad en sectores afectados, y un plan de fertilización balanceado y homogéneo que evite la concentración de nutrientes en zonas específicas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizados en el CELM

Variable	Unidad	Media	SD	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	Skewness
Arena	%	56.91	5.58	9.81	56.56	41.28	69.28	-0.66
Limo	%	25.83	5.88	22.76	25.28	11.28	43.28	0.56
Arcilla	%	17.27	3.55	20.54	17.44	11.44	28.16	0.63
pH	Unidad	6.98	0.48	6.90	6.88	6.56	9.66	4.01
CE	dS m ⁻¹	4.22	2.80	66.46	3.59	1.16	11.21	1.03
MO	%	1.62	0.33	20.37	1.51	1.13	2.26	0.39
CaCO ₃	%	0.06	0.14	257.23	0.00	0.00	0.44	2.15
Ca ²⁺	cmol kg ⁻¹	6.45	0.20	3.04	6.45	6.01	6.93	0.34
Mg ²⁺	cmol kg ⁻¹	1.91	0.30	15.48	1.95	1.12	2.45	-0.71
Na ⁺	cmol kg ⁻¹	0.60	0.24	40.95	0.57	0.13	1.59	1.34
K ⁺	cmol kg ⁻¹	0.41	0.21	51.61	0.37	0.11	0.97	1.19
CICe	cmol kg ⁻¹	9.37	0.23	2.50	9.35	8.89	9.93	0.38
PCI	%	68.86	2.40	3.49	68.73	64.81	74.86	0.63
PMI	%	20.44	3.14	15.37	20.89	11.96	25.92	-0.75
PPI	%	4.35	2.18	50.03	3.92	1.23	10.10	1.10
PSI	%	6.35	2.59	40.79	5.95	1.43	16.92	1.38
Fe	mg kg ⁻¹	11.62	5.96	51.31	10.64	2.03	30.82	1.00
Cu	mg kg ⁻¹	3.19	1.80	56.28	3.21	0.06	6.68	-0.10
Zn	mg kg ⁻¹	13.47	6.40	47.48	11.90	2.56	26.38	0.43
Mn	mg kg ⁻¹	1.21	0.19	15.88	1.22	0.80	1.55	-0.24
P disp.	mg kg ⁻¹	14.12	8.98	63.59	12.76	2.97	45.16	1.44
K disp.	mg kg ⁻¹	159.61	82.44	51.65	144.02	44.80	378.27	1.19

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

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

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

Procedimiento:

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

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

Procedimiento:

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

La caracterización geoestadística de las propiedades fisicoquímicas del suelo en el Centro Experimental La Molina (CELM) 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 gaussianas, esféricas, exponenciales y lineales, con rangos de influencia que variaron entre 73 y 756 m, lo que evidencia desde comportamientos altamente estructurados hasta distribuciones dominadas por variabilidad local.

Las variables con mayor consistencia espacial fueron el calcio intercambiable (Ca^{2+}), el potasio y manganeso disponibles, las cuales mostraron una alta predictibilidad espacial con coeficientes de determinación superiores a 0.60. El calcio intercambiable, modelado mediante una función gaussiana con un rango de 361 m y un R^2 de 0.71, presentó una distribución homogénea y controlada por procesos edáficos estables, evidenciando una clara continuidad espacial. De forma similar, el potasio disponible mostró un comportamiento altamente estructurado bajo un modelo gaussiano ($R^2 = 0.69$; rango = 107 m), aunque con variaciones locales marcadas atribuibles a su limitada movilidad en el suelo. El manganeso, con el mayor grado de dependencia espacial ($R^2 = 0.87$; rango = 375 m), evidenció una distribución coherente y predecible, lo que permite delimitar con precisión zonas de diferente disponibilidad de este micronutriente.

En un nivel intermedio de predictibilidad se ubicaron variables como la arcilla, el pH, la materia orgánica, el carbonato de calcio (CaCO_3), el potasio intercambiable (K^+), el sodio intercambiable (Na^+), el hierro (Fe), el cobre (Cu), el zinc (Zn) y los porcentajes de cationes intercambiables (PCI, PMI y PPI). La fracción arcillosa se ajustó a un modelo exponencial ($R^2 = 0.41$; rango = 379 m), lo que indica una textura relativamente estable con variaciones graduales a escala local. El pH, modelado mediante una función esférica ($R^2 = 0.49$; rango = 221 m), mostró una variación suave y continua a lo largo del área, lo que respalda la elaboración de mapas de reacción del suelo confiables. La materia orgánica presentó un modelo lineal ($R^2 = 0.41$; rango = 252 m), con una dependencia espacial moderada que sugiere transiciones graduales entre zonas de distinto contenido orgánico. El carbonato de calcio (CaCO_3), con un modelo exponencial ($R^2 = 0.32$; rango = 361 m), presentó una estructura espacial influenciada por el material parental, mientras que el potasio (K^+) y el sodio (Na^+) intercambiables, con modelos lineales y rangos amplios (469 y 756 m, respectivamente), reflejaron una continuidad espacial

alta y cambios graduales en la saturación de bases. El micronutriente hierro mostró una estructura moderada, con ajuste a modelo gaussiano y un $R^2 = 0.50$, lo que indica una distribución controlada por procesos edáficos locales y adecuada para interpolaciones temáticas. Finalmente, el porcentaje de calcio intercambiable (PCI), presentó un modelo exponencial con valores bajos de $R^2 (<0.15)$, lo que, si bien refleja alta variabilidad local, evidencia cierta coherencia espacial a pequeña escala.

En contraste, un grupo de variables mostró baja predictibilidad espacial, con estructuras débiles o prácticamente aleatorias. Entre ellas se incluyen la arena, el limo, la conductividad eléctrica (CE), el fósforo disponible, el magnesio intercambiable (Mg^{2+}), la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), los micronutrientes cobre y zinc, porcentaje de magnesio intercambiable (PMI) y porcentaje de potasio intercambiable (PPI). La arena, ajustada a un modelo gaussiano ($R^2 = 0.26$; rango = 378 m), y el limo, con un modelo exponencial ($R^2 = 0.07$; rango = 361 m), evidenciaron escasa continuidad espacial, probablemente debido a la influencia de la variabilidad topográfica y procesos deposicionales. La CE, modelada mediante una función esférica ($R^2 = 0.02$; rango = 333 m), presentó una fuerte variabilidad local, asociada a diferencias en el contenido de sales solubles y a la dinámica temporal de humedad. El fósforo disponible ($R^2 = 0.30$; rango = 257 m) mostró una estructura incipiente, lo que sugiere la necesidad de un muestreo más denso para representar adecuadamente su distribución. Por su parte, el magnesio intercambiable ($R^2 = 0.19$; rango = 361 m) y la CICe ($R^2 = 0.14$; rango = 482 m) manifestaron una dependencia espacial débil, posiblemente relacionada con la heterogeneidad del material parental y las condiciones microambientales.

En síntesis, los resultados revelan que los suelos del CELM presentan una organización espacial variable, con algunos atributos, como Ca^{2+} , K disponible y Mn, que exhiben una estructura definida y predecible, mientras que otros, como las fracciones texturales y la CE, muestran una alta variabilidad local. Estas diferencias confirman que las propiedades químicas tienden a tener una estructura espacial más estable que las físicas, y que las herramientas geoestadísticas son adecuadas para la zonificación edáfica y el manejo sitio-específico de la fertilidad del suelo en la zona. Sin embargo, la baja dependencia espacial observada en variables como el fósforo disponible y la CE sugiere la conveniencia de reforzar el diseño de muestreo y complementar las interpolaciones con análisis multivariados, a fin de mejorar la precisión y la confiabilidad de los mapas temáticos generados.

Tabla 3. Modelos de semivariograma para las propiedades del suelo del CELM

Variable	Modelo	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R ²
Arena	<i>Gaussian</i>	0.30	0.45	378.45	0.81	0.26
Limo	<i>Exponential</i>	0.07	0.28	361.00	0.63	0.07
Arcilla	<i>Exponential</i>	0.47	0.67	378.75	1.32	0.41
pH	<i>Spherical</i>	0.04	0.06	220.77	0.01	0.49
CE	<i>Spherical</i>	6.88	7.05	332.59	0.74	0.02
MO	<i>Linear</i>	0.10	0.12	252.25	0.00	0.41
P disp.	<i>Gaussian</i>	0.85	0.91	256.85	0.94	0.30
K disp.	<i>Gaussian</i>	0.77	1.18	107.22	1.05	0.69
CaCO ₃	<i>Exponential</i>	0.03	0.16	361.02	0.12	0.32
Ca ²⁺	<i>Gaussian</i>	0.01	0.02	361.00	0.27	0.71
Mg ²⁺	<i>Spherical</i>	0.01	0.03	361.00	0.18	0.19
K ⁺	<i>Linear</i>	0.03	0.04	468.83	0.01	0.48
Na ⁺	<i>Linear to Sill</i>	0.04	0.02	755.76	0.01	0.24
ClCe	<i>Linear</i>	0.05	0.06	481.83	0.01	0.14
PCI	<i>Exponential</i>	0.12	0.25	361.02	0.55	0.07
PMI	<i>Gaussian</i>	0.00	8.23	76.66	3.58	0.13
PPI	<i>Gaussian</i>	0.00	2.70	73.21	0.44	0.08
PSI	<i>Spherical</i>	1.24	4.05	122.37	0.50	0.46
Fe	<i>Gaussian</i>	0.50	0.63	214.66	0.69	0.50
Cu	<i>Gaussian</i>	2.47	2.93	375.26	0.30	0.29
Zn	<i>Spherical</i>	0.33	0.43	361.00	0.67	0.30
Mn	<i>Gaussian</i>	0.01	0.05	375.26	0.01	0.87

CE: Conductividad eléctrica en extracto de saturación, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, ClCe: capacidad de intercambio catiónico efectiva, PCI: porcentaje de calcio intercambiable, PMI: porcentaje de magnesio intercambiable, PPI: porcentaje de potasio intercambiable y PSI: porcentaje de sodio intercambiable, RMSE: raíz del error cuadrático medio, R²: coeficiente de determinación.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Los mapas generados para el CELM-INIA (Figuras 9-22) evidencian gradientes espaciales consistentes en las principales propiedades edáficas con alta predictibilidad geoestadística, lo que permite establecer zonas de manejo agronómico diferenciado basadas en la variación real del suelo. La organización espacial observada responde a la interacción entre el material textural franco arenoso y los procesos de manejo agrícola, configurando un paisaje con variaciones graduales pero significativas en la reacción del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la textura.

El pH del suelo presenta un patrón de variación suave, con valores predominantemente neutros y ligeras tendencias alcalinas hacia determinados sectores. Este comportamiento indica un entorno químico estable, favorable para la disponibilidad general de nutrientes, aunque con posibles limitaciones puntuales en la absorción de micronutrientes como el hierro y el zinc en zonas más alcalinas. Los gradientes espaciales de pH definidos y predecibles ofrecen una base sólida para planificar estrategias de enmiendas de yeso agrícola y manejo de fertilizantes fosfatados, orientando las dosis según las condiciones de reacción local del suelo.

El potasio disponible (K) muestra uno de los gradientes espaciales más claros e interpretables, con zonas de alta concentración que contrastan marcadamente con áreas de menor contenido. Este patrón se asocia a diferencias texturales y a la saturación de bases, lo que permite identificar sectores donde la aplicación de fertilizantes potásicos podría reducirse sin afectar la disponibilidad para el cultivo, y otras áreas donde sería necesaria una reposición más frecuente. La alta continuidad espacial del K y su fuerte dependencia estructural respaldan el uso de mapas temáticos como herramienta directa para la planificación de la fertilización sitio-específica.

El calcio intercambiable (Ca^{2+}) exhibe un comportamiento espacial igualmente estable, con una distribución amplia y homogénea que refuerza la buena saturación de bases del suelo del CELM. Las variaciones graduales de Ca^{2+} a lo largo del centro experimental reflejan condiciones edáficas equilibradas y, en combinación con el pH, permiten delimitar áreas con mayor capacidad tampón y mejor disponibilidad de macronutrientes secundarios. Estas zonas pueden considerarse de menor prioridad en la aplicación de correctivos o enmiendas calcáreas, optimizando el manejo de recursos.

El manganeso (Mn) destaca por su alta dependencia espacial y distribución coherente, lo que lo convierte en un excelente indicador de procesos edáficos locales. Sus valores relativamente uniformes sugieren una disponibilidad adecuada, aunque su ligera tendencia a concentrarse en áreas de menor pH o mayor contenido de arcilla indica que su dinámica está controlada por la reacción del suelo. La relación entre los gradientes de pH y Mn puede utilizarse para ajustar planes de fertilización de micronutrientes, especialmente en cultivos sensibles a la deficiencia o toxicidad de este elemento.

En cuanto a las propiedades físicas, las fracciones texturales, principalmente arena y limo, muestran gradientes bien definidos, con predominio de suelos franco-arenosos en la mayor parte del área y zonas más limosas o arcillosas en sectores de acumulación. Estas variaciones determinan diferencias locales en retención de agua, aireación y movilidad de nutrientes, condicionando la respuesta a la fertilización y al riego. En los sectores con mayor proporción de arena, la reposición de nutrientes deberá ser más frecuente debido a la menor capacidad de intercambio y retención, mientras que en las áreas más finas es posible optimizar la eficiencia de los fertilizantes mediante aplicaciones ajustadas a la textura.

En conjunto, los gradientes edáficos observados reflejan una organización espacial suficientemente estructurada para sustentar la elaboración de mapas de manejo de la fertilidad del suelo. Las variables con mayor continuidad espacial (pH, K disponible, Ca²⁺ y Mn) permiten definir zonas de manejo homogéneo y orientar con precisión los programas de fertilización y de enmiendas. Esta integración de información geoestadística y edáfica constituye una herramienta clave para la zonificación de la fertilidad y la transición hacia una agricultura de precisión en el CELM del INIA.

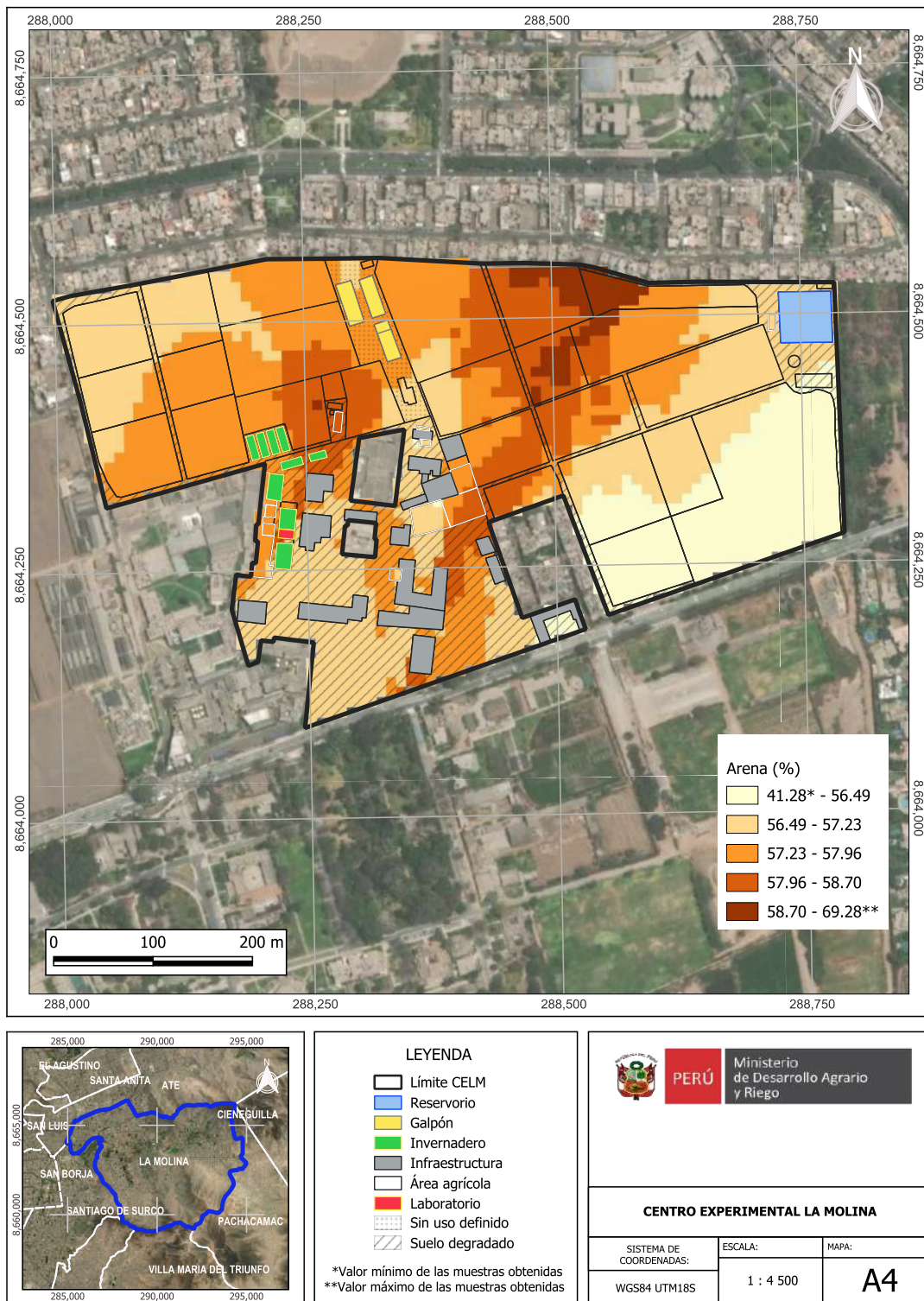


Figura 9. Mapa de variación espacial del porcentaje de arena

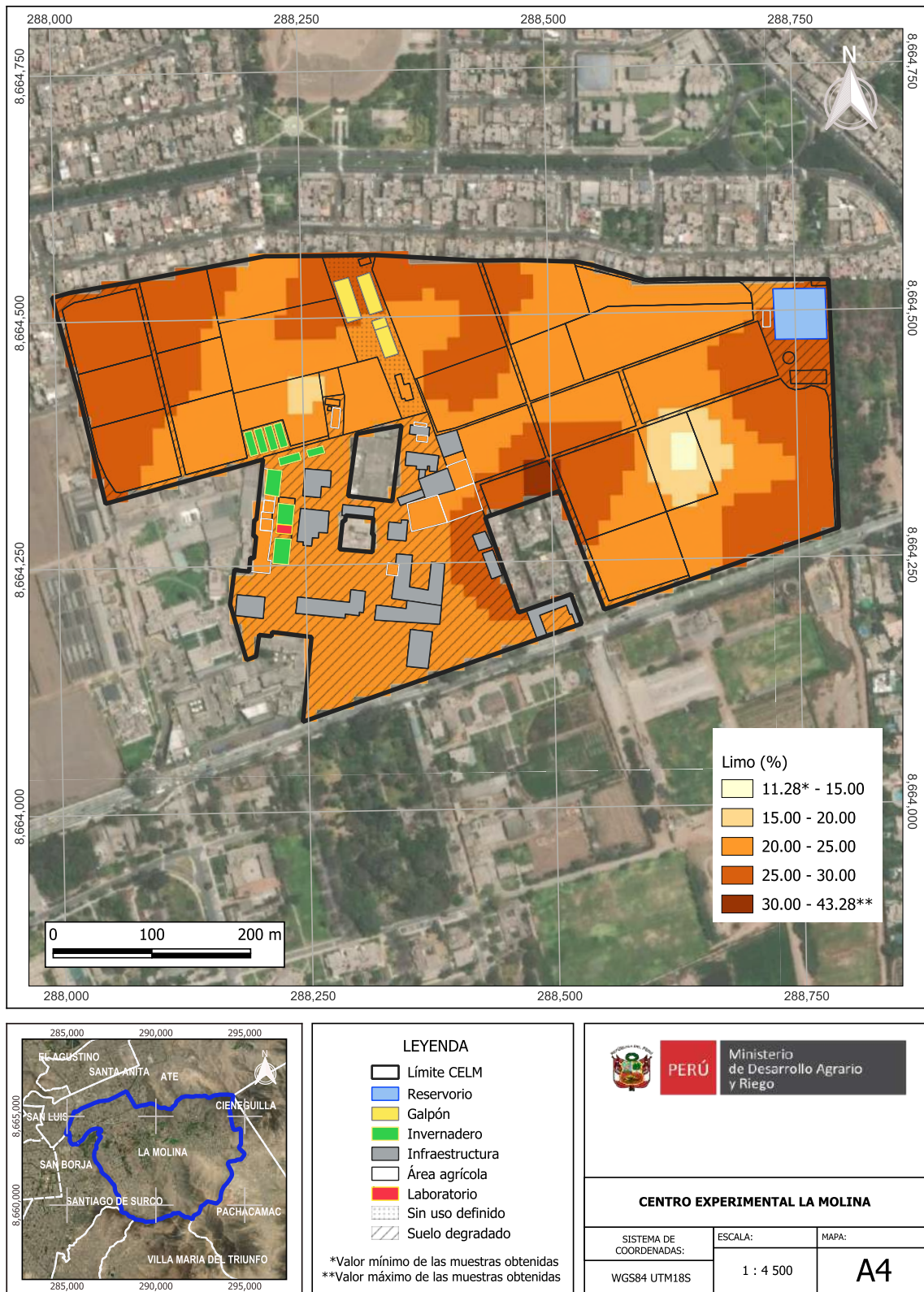


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de limo

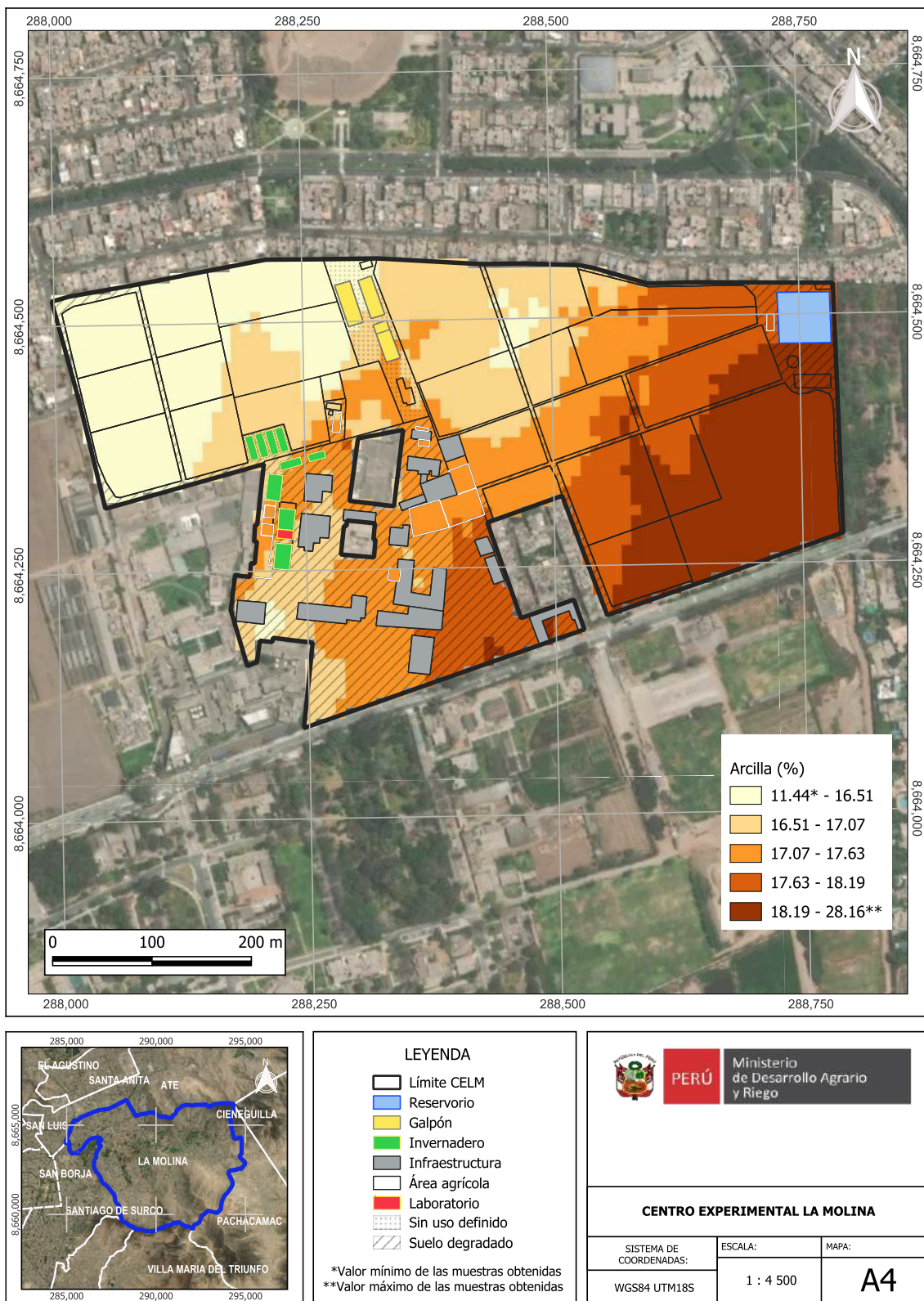


Figura 11. Mapa de variación espacial del porcentaje de arcilla

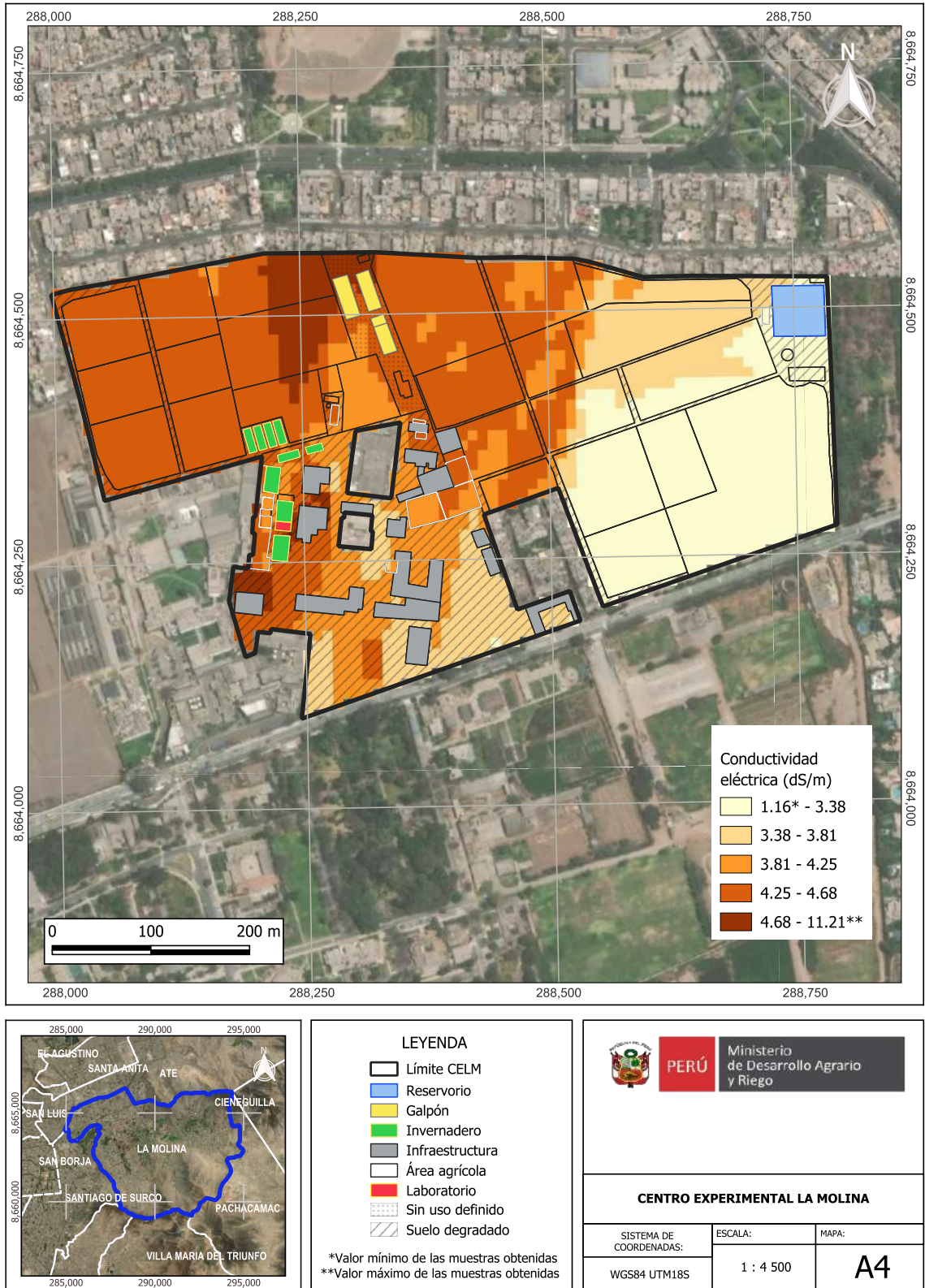


Figura 12. Mapa de variación espacial de la conductividad eléctrica

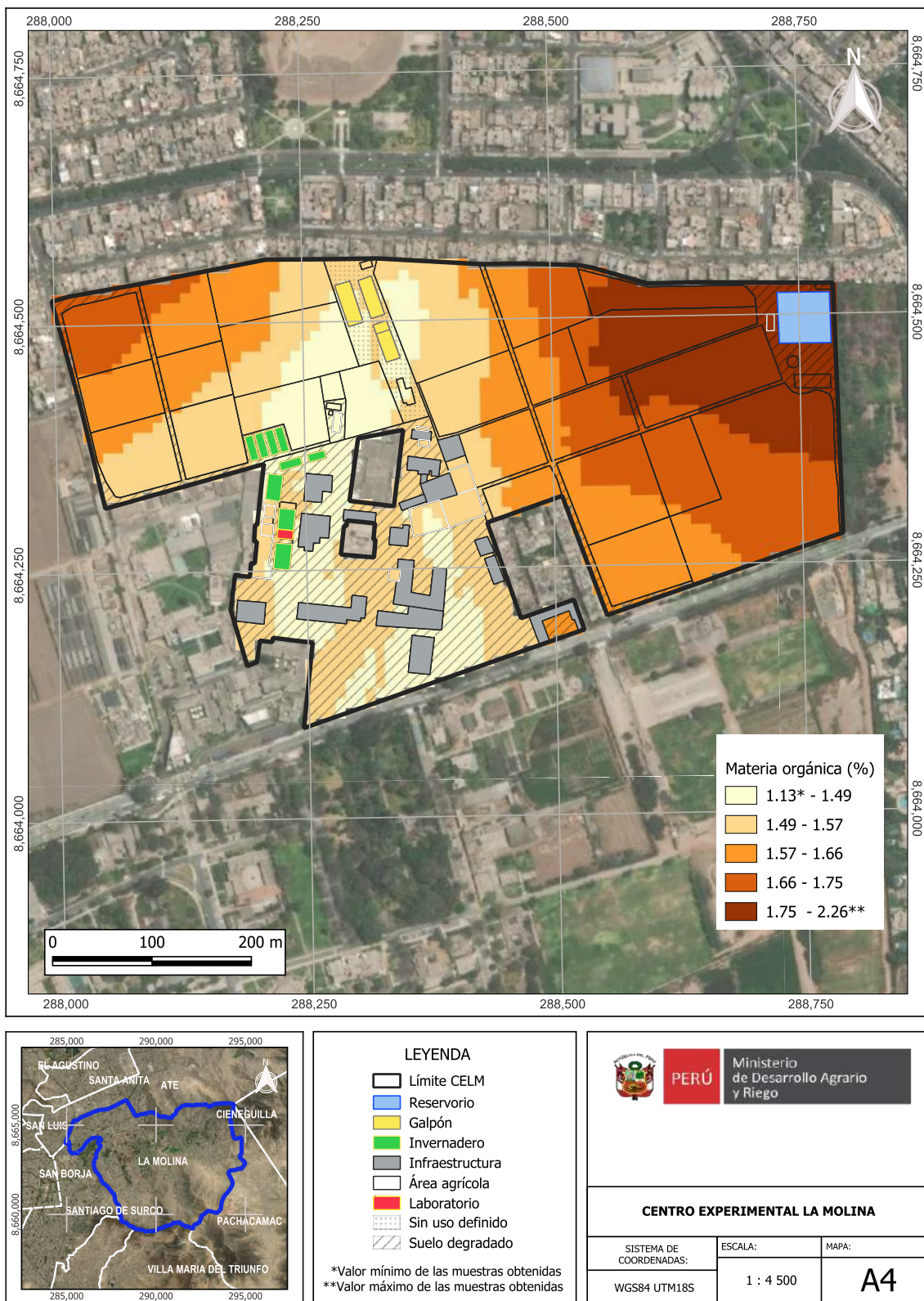


Figura 13. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

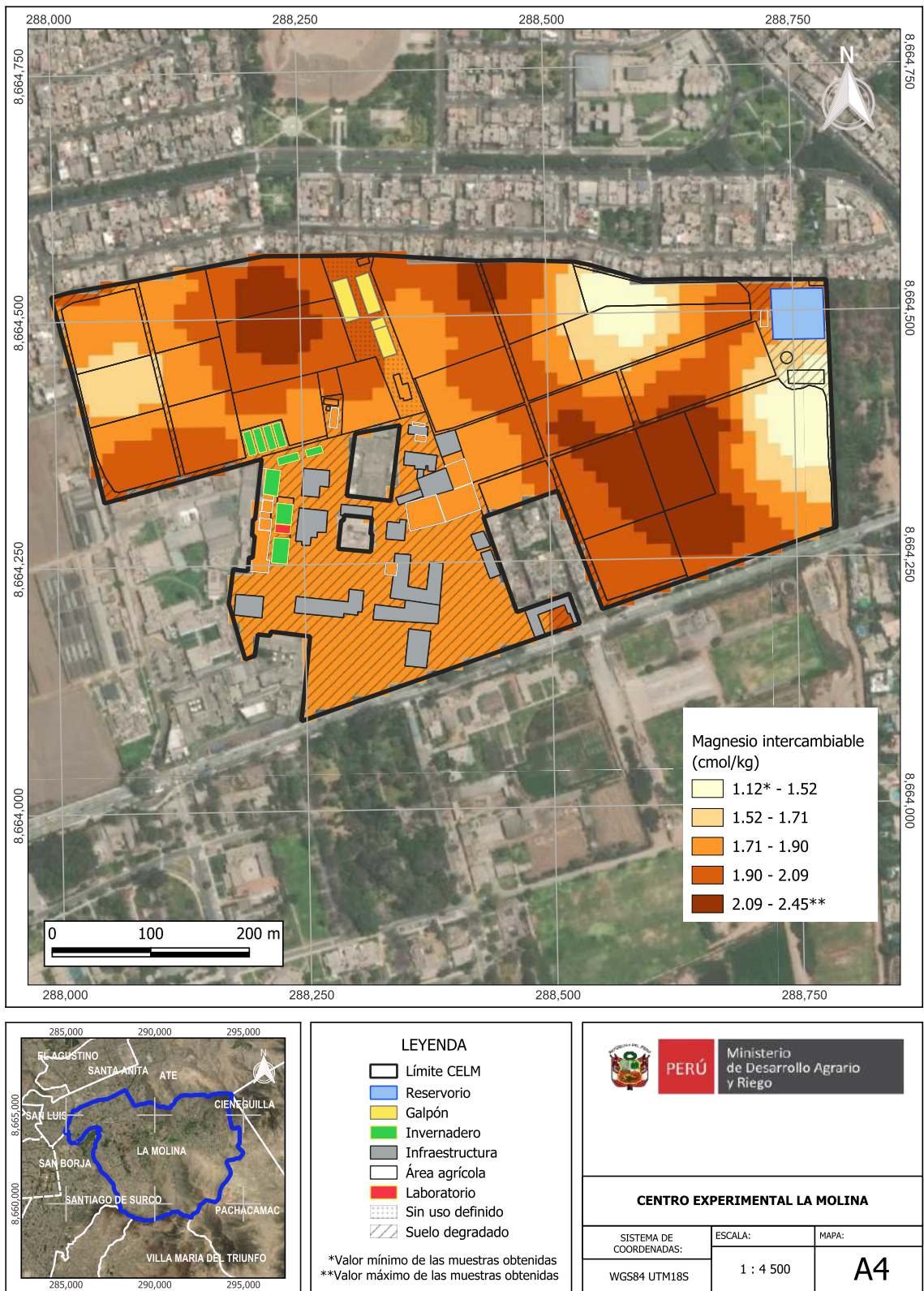


Figura 14. Mapa de variación espacial del magnesio (Mg^{2+}) intercambiable

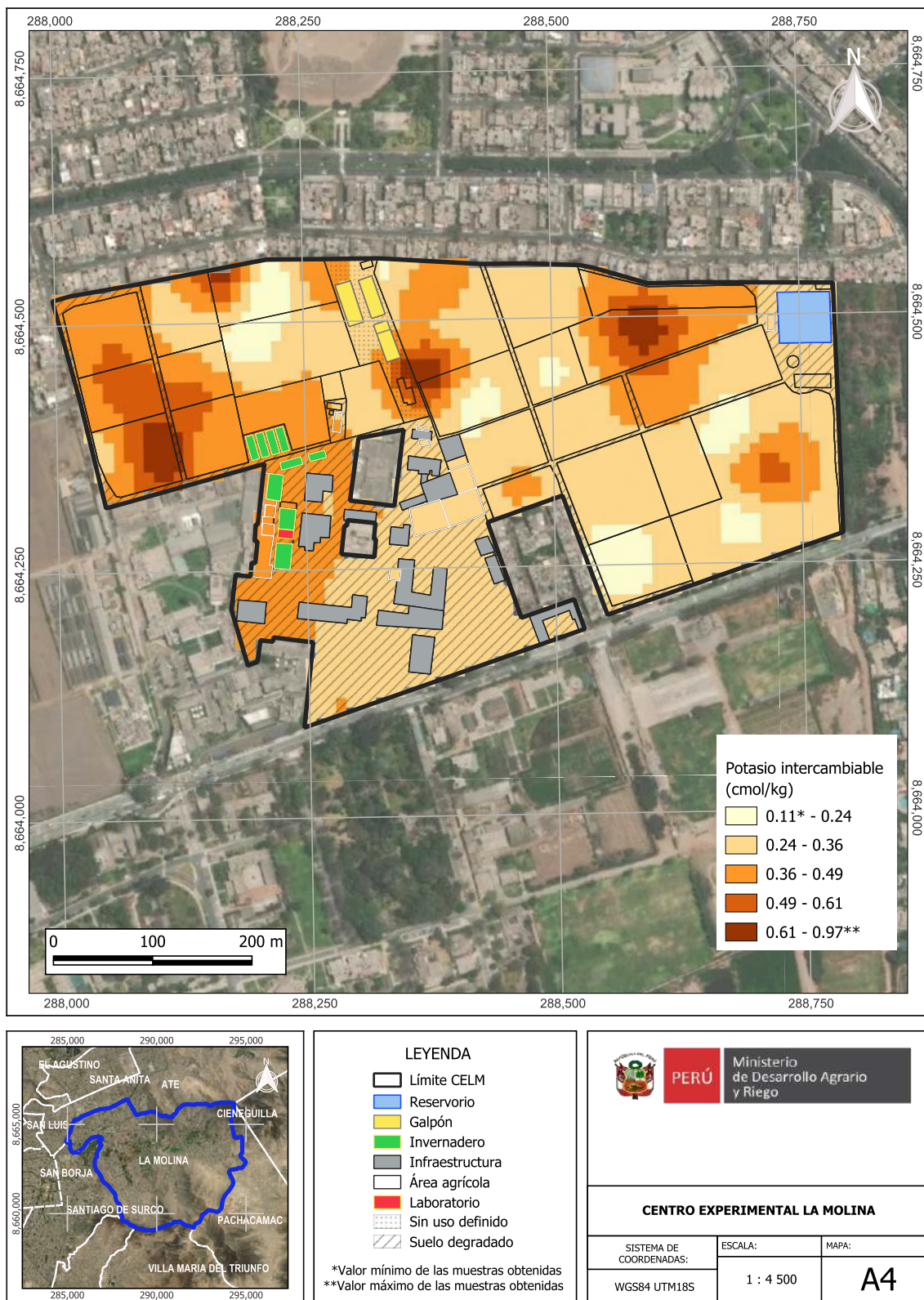


Figura 15. Mapa de variación espacial del potasio (K⁺) intercambiable

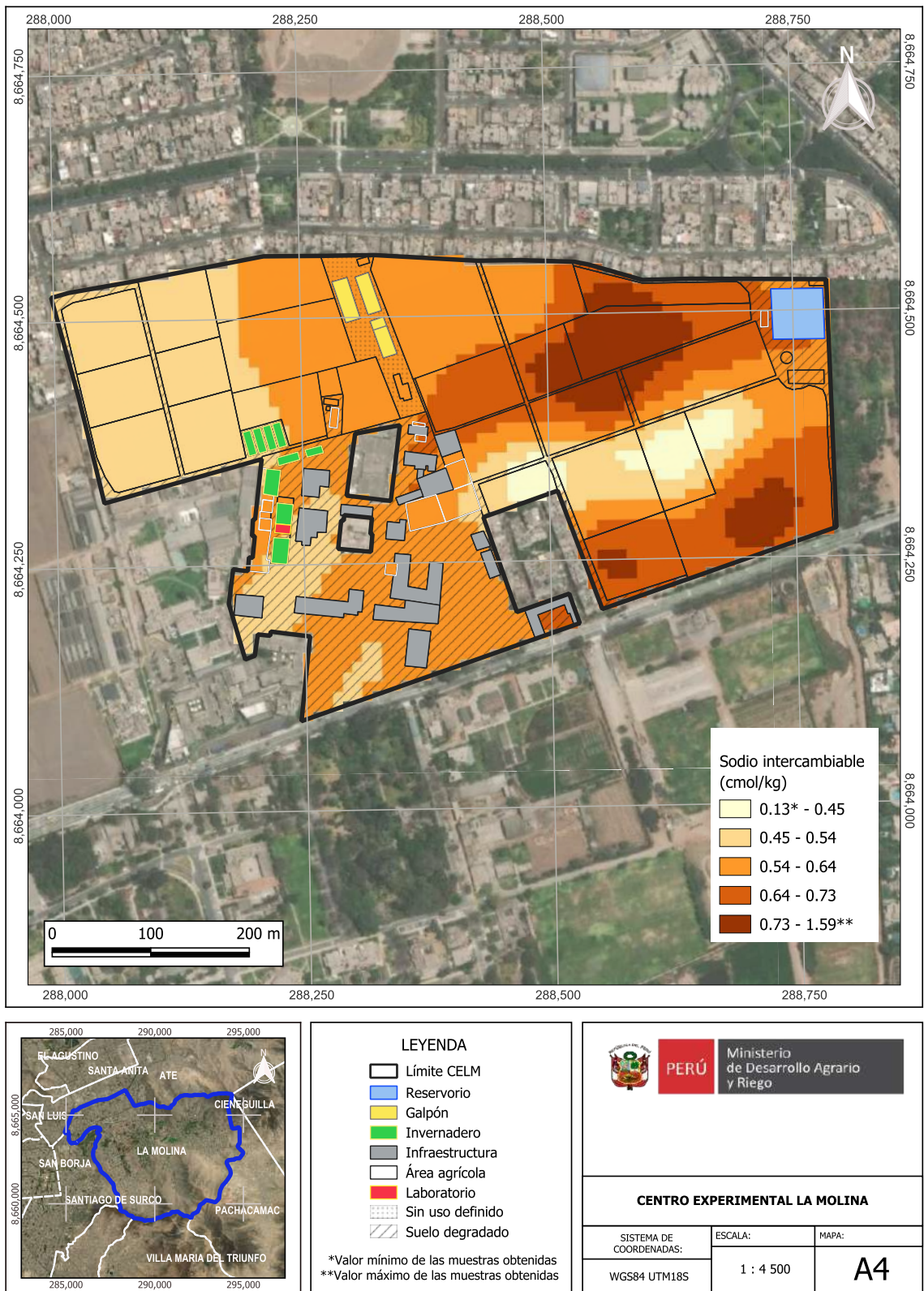


Figura 16. Mapa de variación espacial del sodio (Na⁺) intercambiable

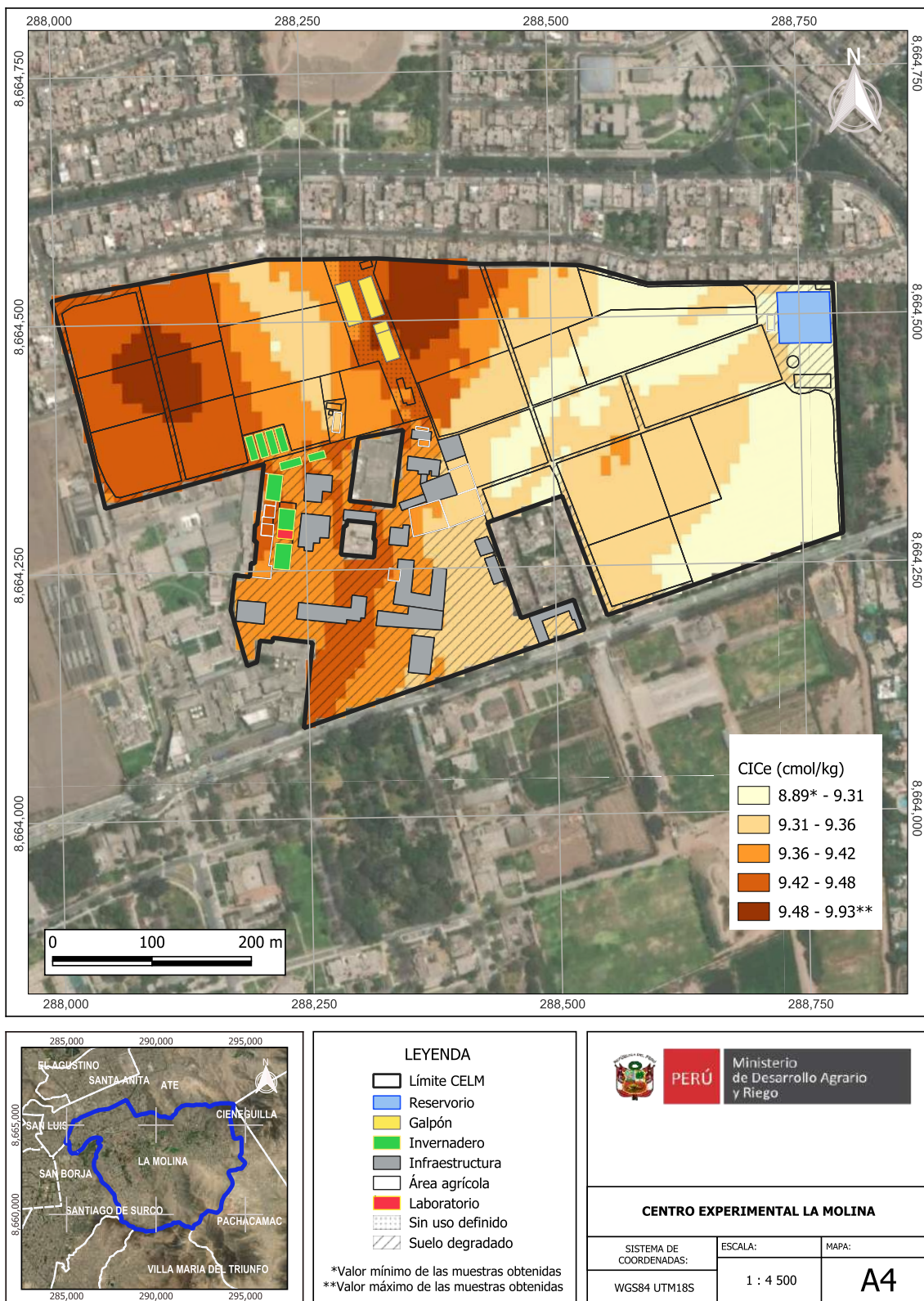


Figura 17. Mapa de variación espacial de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)

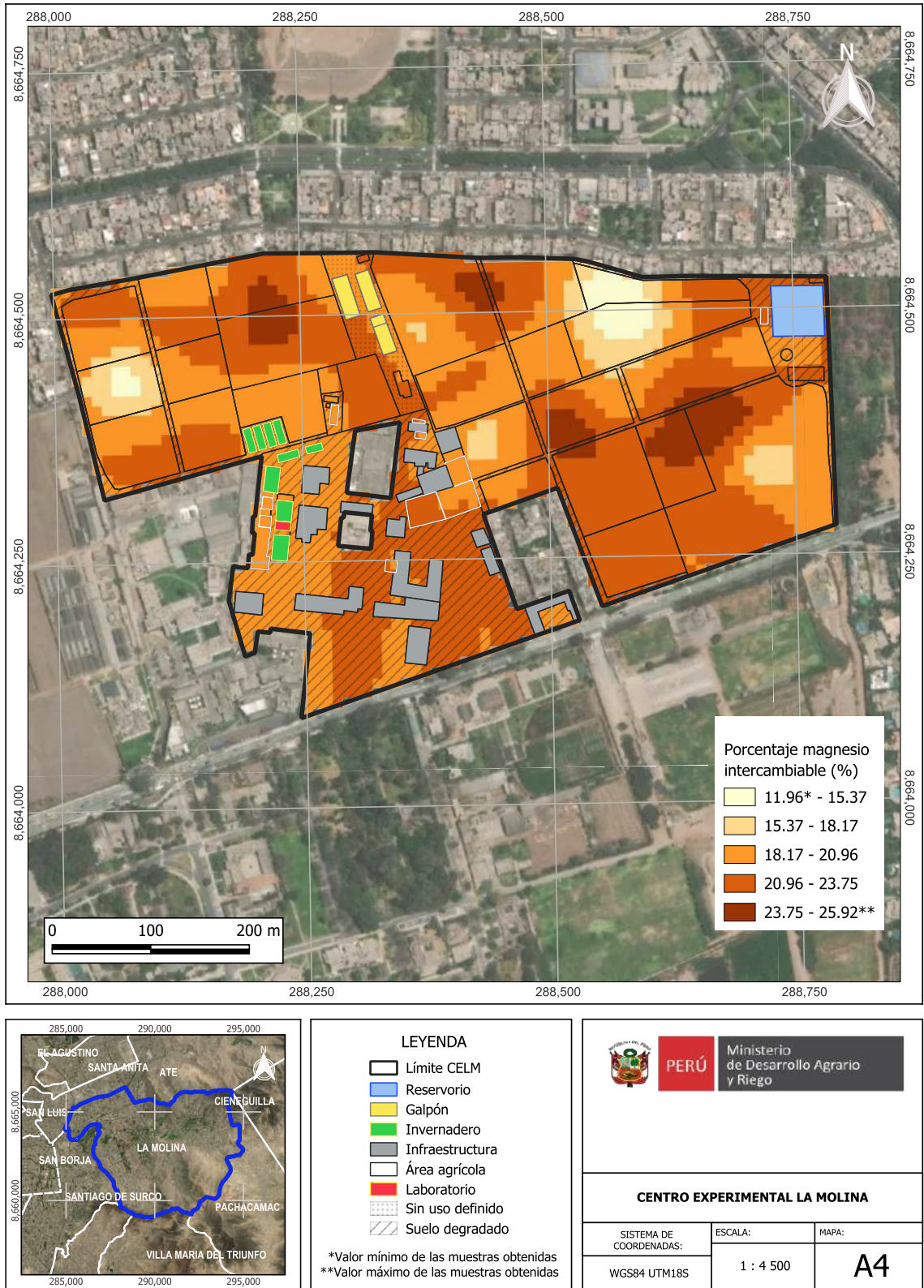


Figura 18. Mapa de variación espacial del porcentaje de magnesio intercambiable (PMI)

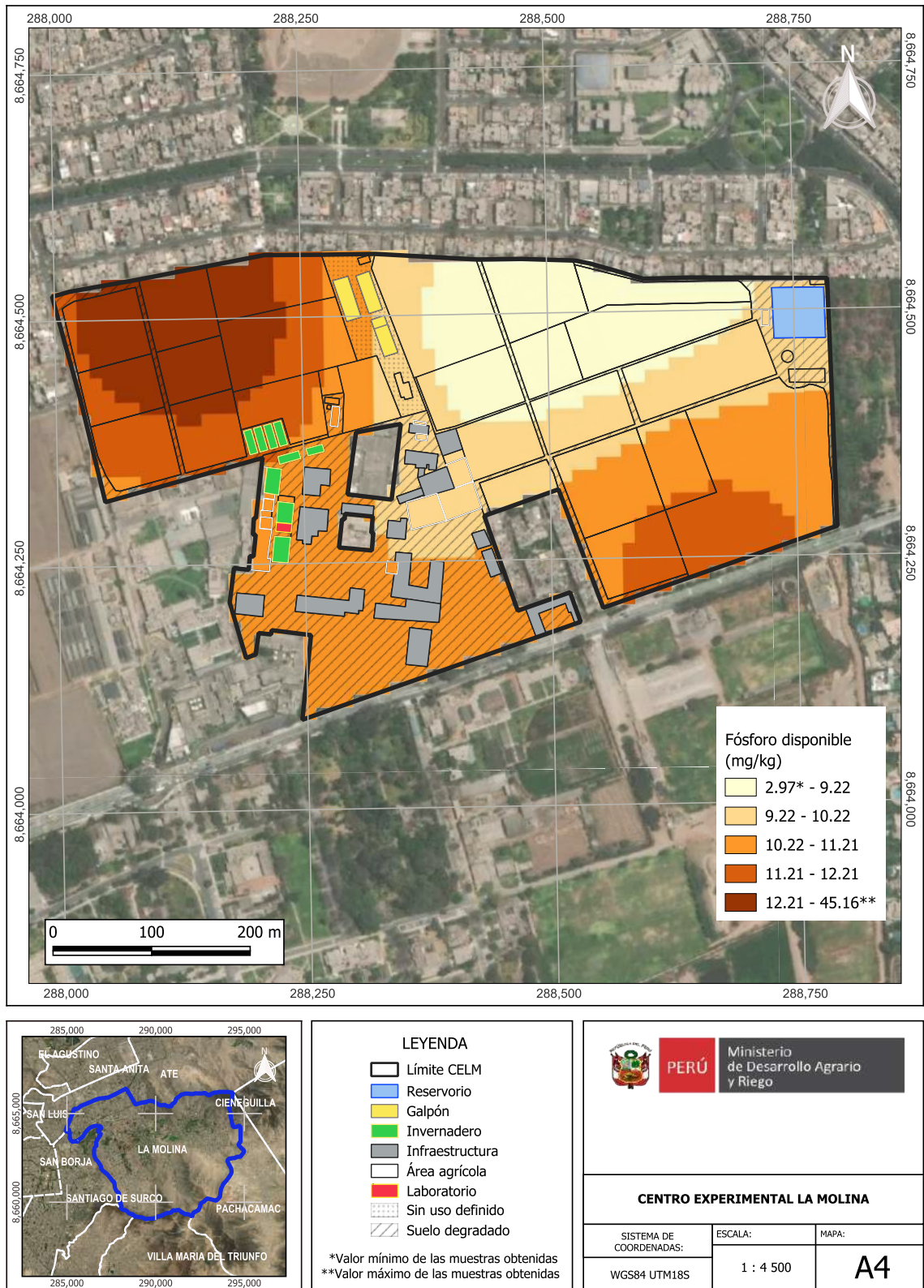


Figura 19. Mapa de variación espacial de la concentración de fósforo disponible

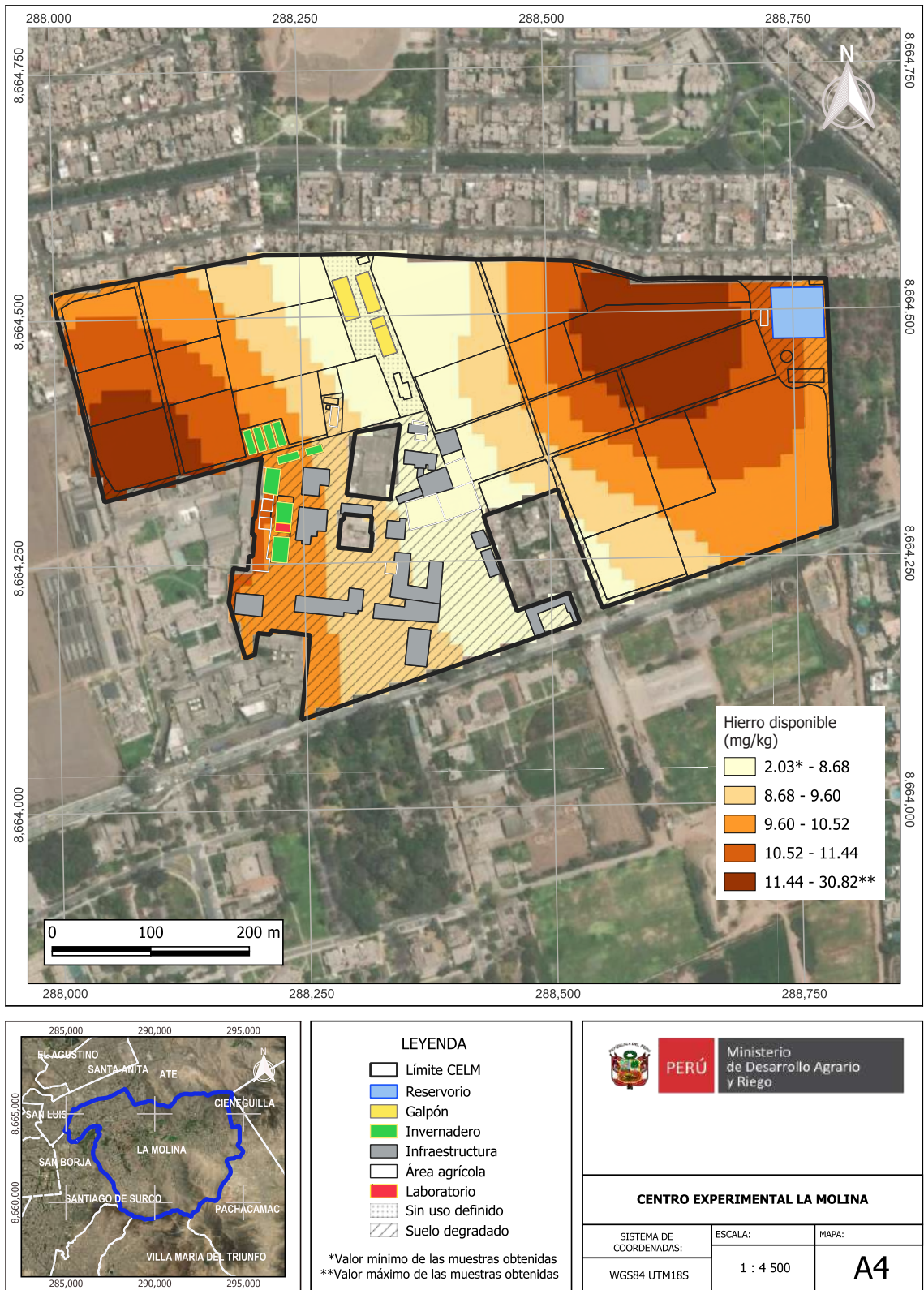


Figura 20. Mapa de variación espacial de la concentración de hierro (Fe) disponible

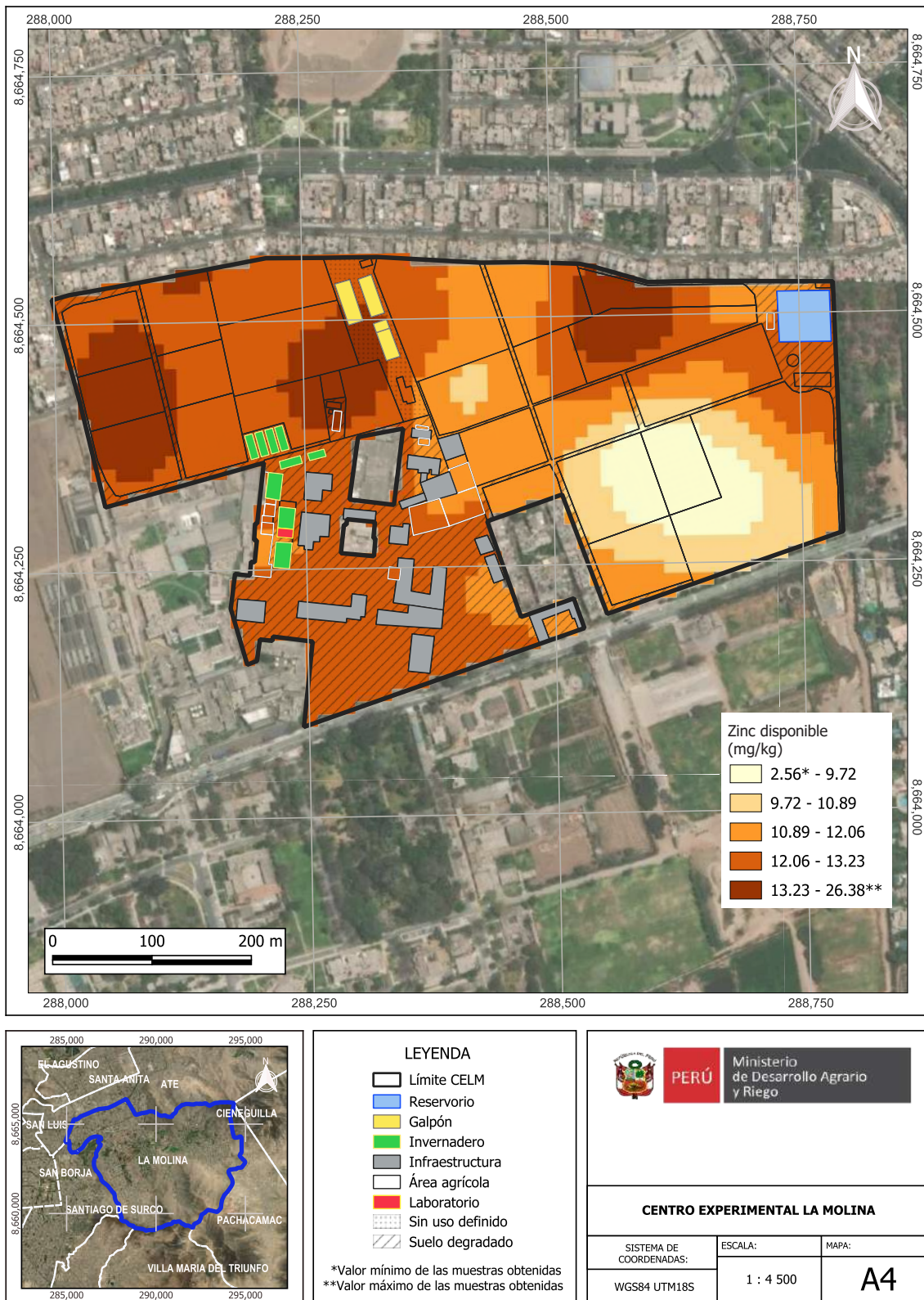


Figura 21. Mapa de variación espacial de la concentración de zinc (Zn) disponible

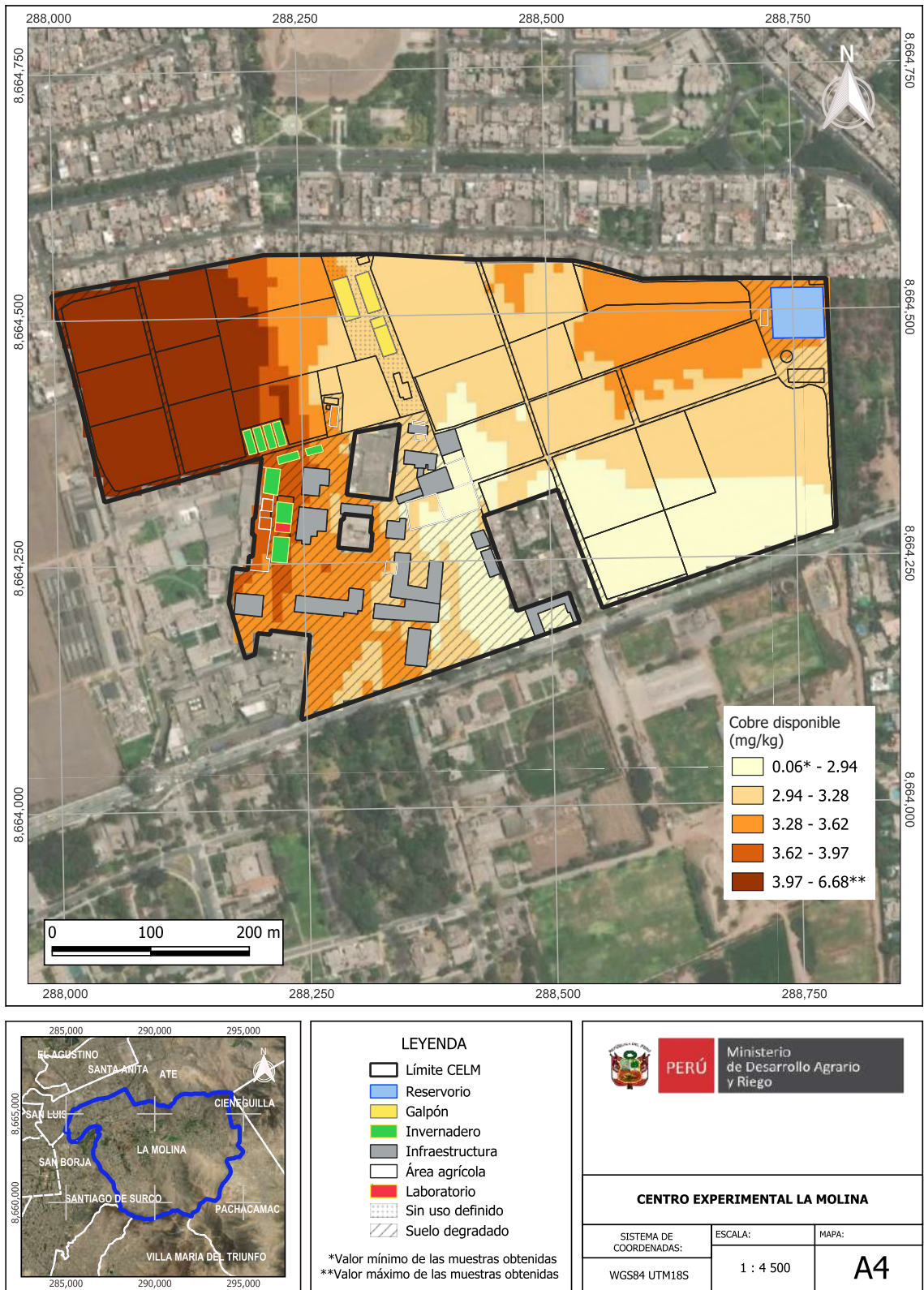
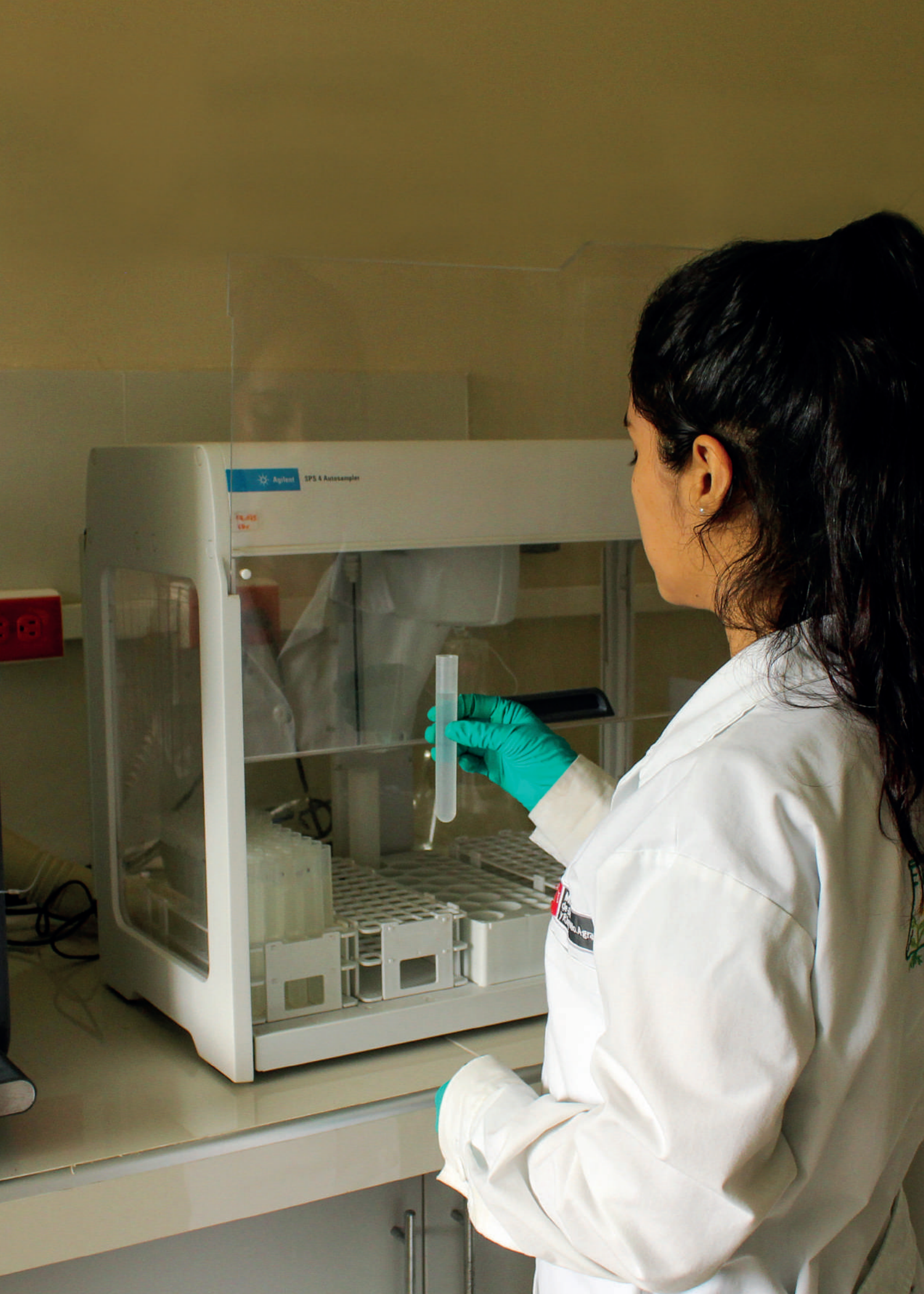


Figura 22. Mapa de variación espacial de la concentración de cobre (Cu) disponible





4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en el CELM

4.1 Índice de saturación de bases catiónicas

4.1.1. Variación espacial del calcio intercambiable y corrección de desequilibrios catiónicos

La interpretación de la saturación de bases de los suelos del Centro Experimental La Molina (CELM) revela, en términos generales, relaciones catiónicas en condiciones de baja capacidad de intercambio catiónico efectiva (mediana = $9.35 \text{ cmol kg}^{-1}$; rango = $8.89\text{-}9.93 \text{ cmol kg}^{-1}$), lo que implica que pequeñas variaciones en mEq de Na o Mg producen grandes cambios porcentuales, por lo que las decisiones prácticas deben priorizar la corrección de desequilibrios mediante técnicas de zonificación edafológica y agricultura de precisión.

En este contexto, en términos geoestadísticos, un R^2 de 0.71 y un rango de 361 m indican que el Ca^{2+} presenta variación espacial estructurada (no aleatoria), y el bajo valor del *nugget* sugiere escasa micro variabilidad no explicada por el muestreo; es decir, las señales detectadas son robustas y atribuibles a causas edáficas. Esta estructura favorece el diseño de estrategias de manejo sitio-específico en lugar de tratamientos uniformes, moduladas por la variación espacial del Ca intercambiable. De esta manera, se han definido cinco zonas de manejo (Figura 23): zona 1 con bajo nivel de Ca ($< 6.01\text{-}6.35 \text{ cmol kg}^{-1}$), zona 2 con nivel medio de Ca ($6.35\text{-}6.40 \text{ cmol kg}^{-1}$), zona 3 con alto nivel de Ca ($6.40\text{-}6.44 \text{ cmol kg}^{-1}$), zona 4 con muy alto nivel de Ca ($6.44\text{-}6.49 \text{ cmol kg}^{-1}$) y zona 5 con excesivo nivel de Ca ($> 6.49\text{-}6.93$). Es importante considerar que todas las zonas presentan concentraciones dentro del rango óptimo reportado para palto, entre 5 y 15 cmol kg^{-1} (Newett et al., 2001). Sin embargo, esta referencia depende de la CIC efectiva, debido a que se han encontrado niveles óptimos de entre 2.3 y 3 cmol kg^{-1} en suelos con baja CIC ($4\text{-}5 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Hofman, 2007), por lo que es imprescindible evaluar el calcio foliar o del fruto en las diferentes zonas de manejo y mantener el porcentaje de saturación por encima de 65 %.

No obstante, la zona 1 con los menores valores de Ca resulta preocupante debido a que coincide con suelos con niveles más bajos de CIC efectiva y con las zonas de mayores porcentajes de sodio intercambiable ($\text{PSI} > 8.04\text{-}16.92 \%$), por encima de umbrales críticos, que deben estar provocando desequilibrios iónicos, y que serían condiciones propicias para problemas nutricionales derivados de la deficiencia de Ca.

En esta zona es probable encontrar problemas fisiológicos por deficiencia de Ca, relacionados con el rendimiento y calidad, debido a que este nutriente cumple funciones metabólicas de gran importancia: (i) en la estructura celular y firmeza, el Ca es el componente central de las pectinas de la lámina media y de las paredes celulares, y niveles insuficientes del elemento en hojas y frutos se asocian a desórdenes fisiológicos, poca firmeza y calidad poscosecha; (ii) en la estabilidad de membrana y señalización, el Ca extracelular e intracelular modula la selectividad catiónica de membranas y la respuesta a estrés, reduciendo pérdidas de K^+ bajo condiciones salinas cuando el Ca es suficiente; (iii) en el crecimiento radical y absorción, condiciones de Ca limitante o de sodicidad (alta proporción de Na^+ en el complejo de cambio) degradan la estructura del suelo y reducen la infiltración, limitando la exploración radicular.

Con la finalidad de mitigar los efectos de la sodicidad identificados en los suelos del CELM, se propone la aplicación de enmiendas químicas, siendo el yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) una de las más utilizadas por su capacidad de aportar calcio soluble y favorecer el desplazamiento de sodio de los complejos de intercambio. A continuación, se presenta un ejemplo de dosis de yeso agrícola para la zona 1 con bajo nivel de Ca y muy alto peligro de sodicidad (Figura 24, $R^2 = 0.46$, $\text{PSI} > 8.04\text{-}16.92\%$). Para el cálculo se utilizará la fórmula propuesta por Oster et al. (1999):

$$\text{GR} = 0.00086 \times \text{BD} \times \text{D} \times \text{CECe} \times (\text{ESP}_i - \text{ESP}_f) \quad \dots (12)$$

Donde:

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

BD: densidad aparente del suelo (g 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:

$$\text{GR} = 0.00086 \times 1.3 \times 30 \times 9.31 \times (8.04 - 5) = 0.95 \text{ t ha}^{-1}$$

El requerimiento de yeso sería 0.95 t ha^{-1} para la zona con mayor peligro de sodicidad.

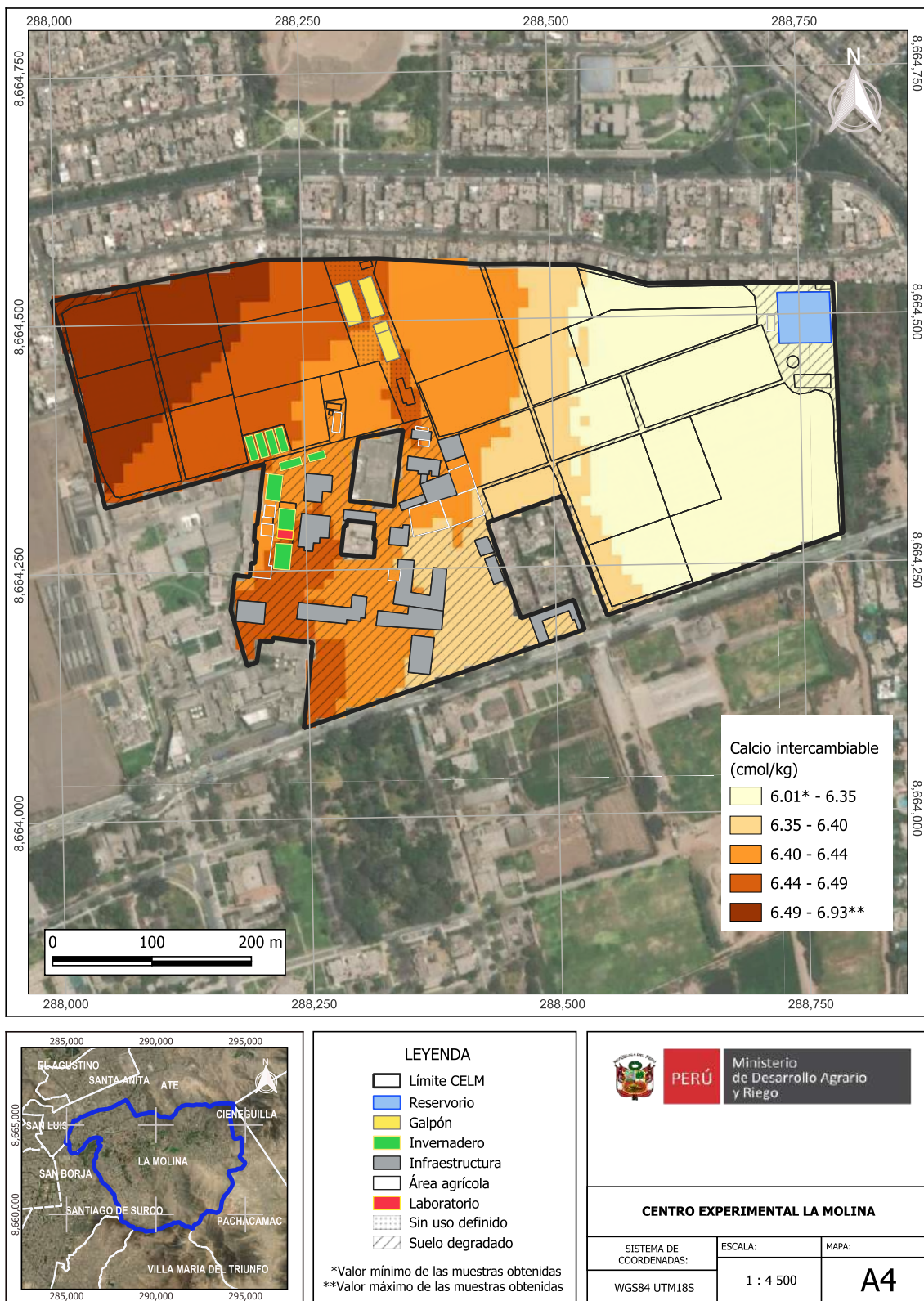


Figura 23. Mapa de variación espacial del calcio (Ca^{2+}) intercambiable

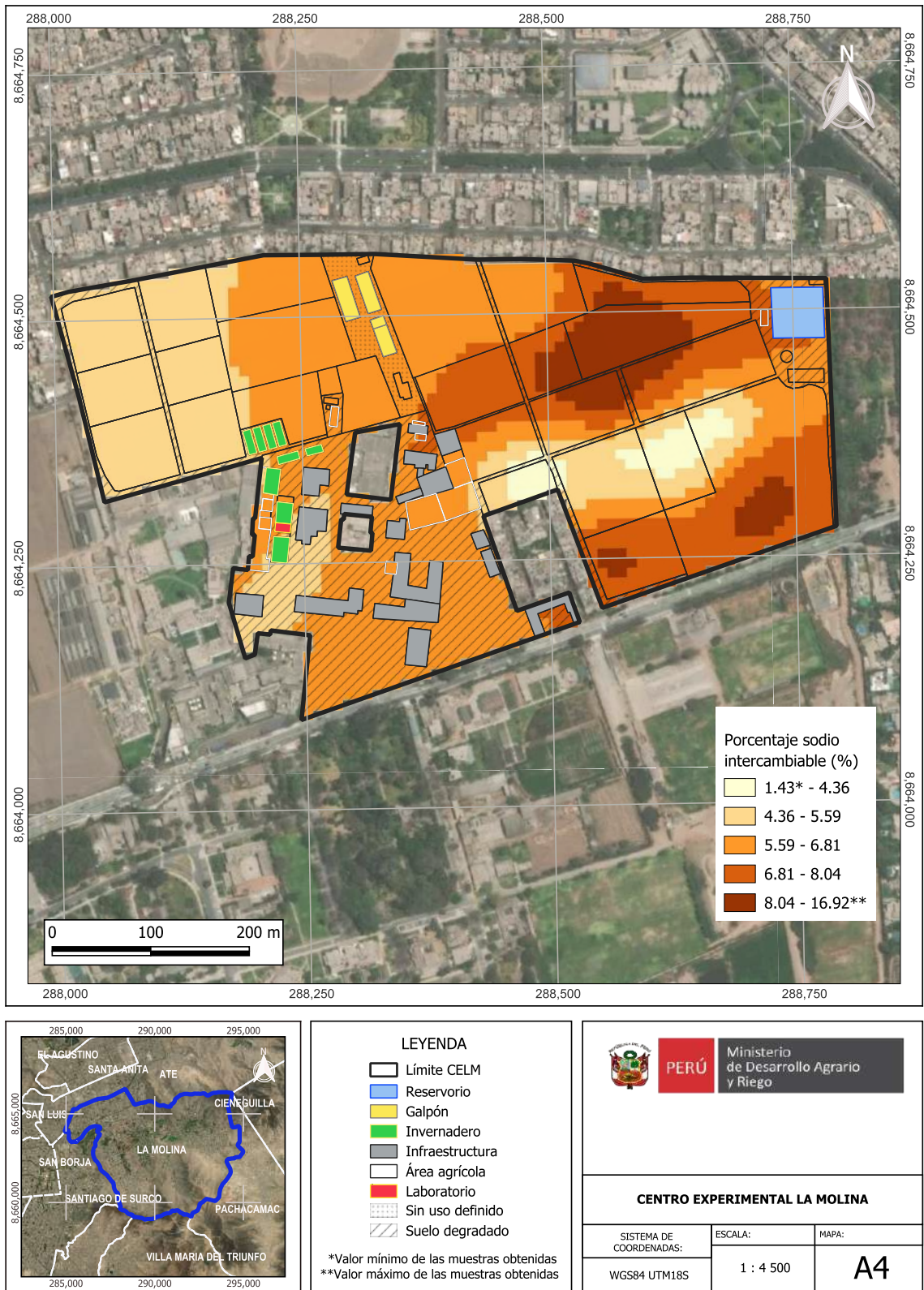


Figura 24. Mapa de variación espacial del porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

4.2. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.2.1. Variación espacial del requerimiento de fertilización potásica para el cultivo de palto

El potasio disponible en los suelos del CELM presenta una media elevada pero muy heterogénea ($K_{disp} = 159.6 \text{ mg kg}^{-1}$, $SD = 82.4$, $CV = 51.7 \%$), con un comportamiento geoestadístico altamente estructurado a corta distancia (modelo gaussiano, rango = 107 m, $R^2 = 0.69$). 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 como el palto. El mapa de variación espacial del K disponible (Figura 25) permitió definir 5 zonas predominantes con diferentes niveles de potasio: Zona 1, nivel muy bajo ($44.8\text{-}87.45 \text{ mg kg}^{-1}$); zona 2, nivel bajo ($87.45\text{-}107.14 \text{ mg kg}^{-1}$); zona 3, nivel medio ($107.14\text{-}126.83 \text{ mg kg}^{-1}$); zona 4, nivel óptimo ($126.83\text{-}146.52 \text{ mg kg}^{-1}$); y zona 5, nivel alto ($146.52\text{-}378.27 \text{ mg kg}^{-1}$). Estas diferencias permiten identificar que, para el cultivo de palto, cuyo umbral crítico es de 250 mg kg^{-1} , se requieren diferentes niveles de fertilización potásica de mantenimiento y construcción. Para este ejemplo práctico, se tomará el plan de fertilización para la zona 1 de muy bajo nivel de K.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 250 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 40 t ha^{-1} . El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 87.45 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 87.45 mg de K por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

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

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos 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:

$$\text{Rendimiento objetivo} = 12 \text{ t ha}^{-1} + 4.2 \text{ t ha}^{-1} = 16.2 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de K utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 6.72 kg de potasio por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de K} = 6.72 \text{ kg de K t}^{-1} \times 16.20 \text{ t ha}^{-1} = 108.86 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de K} = \frac{108.86 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0.70} = 155.52 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 155.52 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 195.52 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 469.25 kg de sulfato de potasio por hectárea en un suelo con muy bajo contenido de K (87.45 mg de K por kg de suelo). Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento de K del cultivo de palto y se construye potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo.

Por otro lado, es importante analizar que las zonas con niveles deficitarios de potasio disponible coinciden con zonas con muy altos niveles de Mg intercambiable y alto PSI, por lo que es posible que ocurran desequilibrios catiónicos en desmedro de los niveles de las reservas de K intercambiable. Debido a esto, se debe considerar la interpretación de análisis complementarios de cationes básicos.

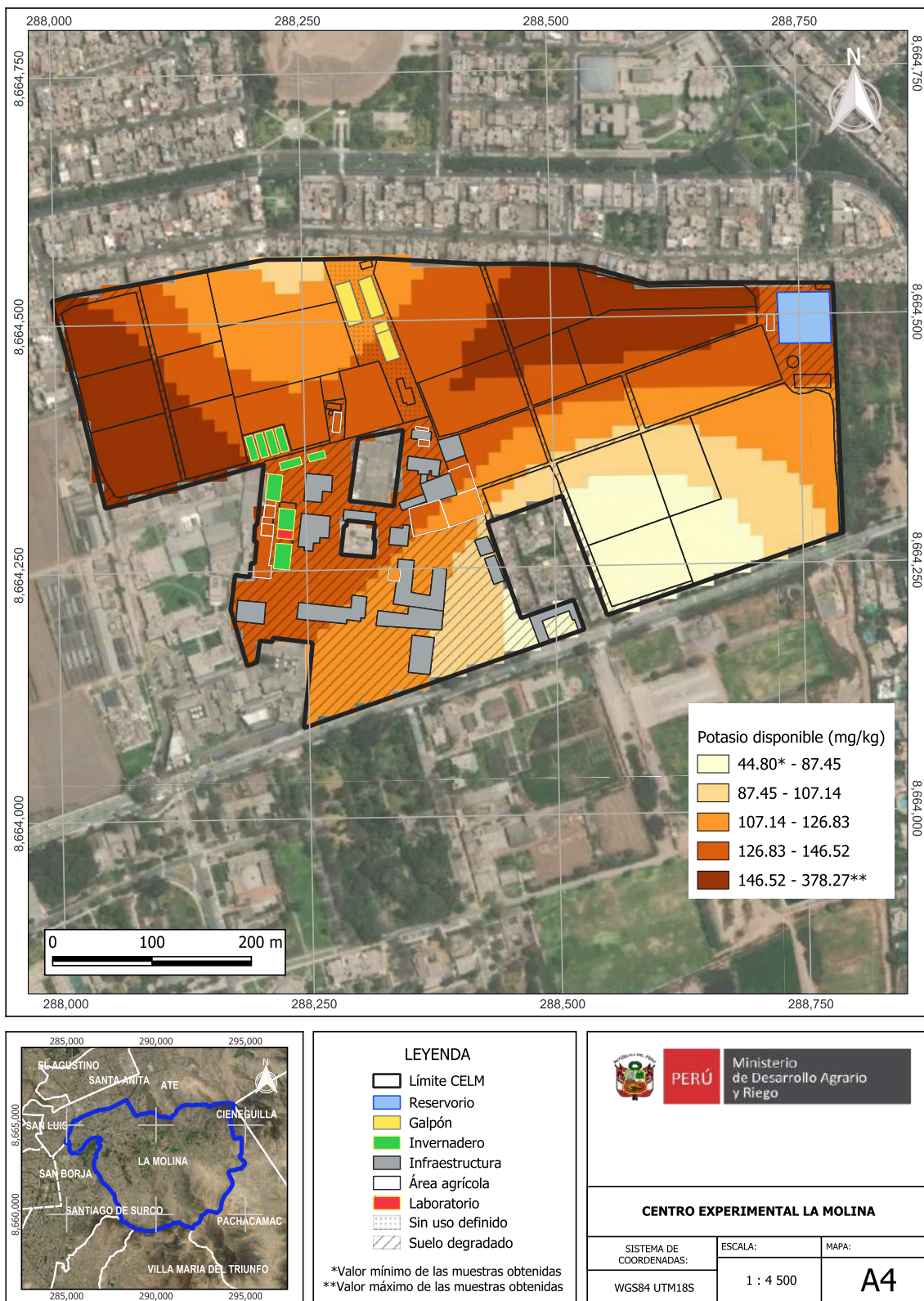


Figura 25. Mapa de variación espacial de la concentración del potasio disponible

4.2.2. Requerimiento de fertilización fosforada de mantenimiento y construcción para el cultivo de palto

El fósforo disponible en los suelos del CELM muestra una alta variabilidad y una estructura espacial débil. Los estadísticos descriptivos (media = 14.12 mg kg⁻¹, SD = 8.98 mg kg⁻¹, CV = 63.6 %) junto con el ajuste geoestadístico (modelo Gaussiano; R² = 0.30) indican que una porción importante de la variación de P ocurre a microescala o responde a factores no estructurados (micro heterogeneidad, aplicaciones localizadas en alta concentración o efectos puntuales de laboreo). En términos prácticos, esto significa que los mapas interpolados de P presentan baja confiabilidad predictiva en muchas zonas del predio. Asimismo, la dependencia espacial detectada no es lo suficientemente fuerte como para tomar decisiones de fertilización basadas exclusivamente en un mapa de interpolación por kriging de P a la resolución original de muestreo. Por tanto, la estrategia operativa más prudente para el P en el CELM es adoptar un enfoque sitio-específico donde el diagnóstico y la prescripción se hagan sobre la base del valor de análisis por sitio, utilizando la mediana del conjunto (12.76 mg kg⁻¹) como referencia de trabajo hasta disponer de calibraciones locales más finas.

En este caso, se tomará como ejemplo el valor de P disponible de 12.76 mg kg⁻¹ para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de palto.

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 40 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 12.76 mg de P-Olsen por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 12.76 mg de P-Olsen por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{50 \times 40 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 20 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.35 \times 20 \text{ t ha}^{-1} = 7 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 20 \text{ t ha}^{-1} + 7 \text{ t ha}^{-1} = 27 \text{ t ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Requerimiento de P} = 1.06 \text{ kg de P t}^{-1} \times 27 \text{ t ha}^{-1} = 28.62 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{28.62 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 95.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 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 1.5 mg de P por kg de suelo.

$$\text{RC} = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{6 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 9 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 95.40 \text{ kg de P ha}^{-1} + 9 \text{ kg de P ha}^{-1} = 104.40 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 519.73 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP). Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento de P del cultivo de palto y se construye fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo.

4.3. El pH del suelo

4.3.1. Variación espacial del manganeso disponible del suelo y su relación con el pH

En el CELM, el pH presenta valores promedio cercanos a la neutralidad (media = 6.98, SD = 0.48), pero con una asimetría pronunciada hacia valores alcalinos (*skewness* = 4.01) y extremos que alcanzan hasta 9.66, lo que indica la presencia de puntos localizados con tendencia a la alcalinidad. Asimismo, el análisis geoestadístico de pH muestra un moderado grado de ajuste entre valores observados y predichos ($R^2 = 0.49$; RMSE = 0.01), es decir, muestra continuidad espacial a escala de parcela, pero con algunas variaciones puntuales. En contraste, el manganeso disponible (Mn) se sitúa en valores bajos en término absoluto (media = 1.21 mg kg⁻¹, SD = 0.19, CV = 15.9 %) y con distribución relativamente simétrica (*skewness* = -0.24). Desde la geoestadística, Mn presentó un alto grado de ajuste ($R^2 = 0.87$; RMSE = 0.01), lo que revela una fuerte dependencia espacial y continuidad amplia. En conjunto, los resultados muestran un pH cercano a neutro, pero con focos alcalinos localizados (Figura 26) y variación espacial de Mn muy estructurada y predecible a mayor escala (Figura 27), condición que hace del Mn una covariable prometedora para mejorar la predicción espacial del pH y para definir unidades de manejo nutricional.

El manganeso disponible (Mn) es un buen indicador funcional de la dinámica del pH en suelos agrícolas porque su solubilidad y disponibilidad aumentan marcadamente al bajar el pH, y disminuyen conforme el pH sube; en suelos neutros y alcalinos el Mn efectivo para la planta tiende a ser bajo, mientras que en suelos ácidos puede alcanzar niveles fitotóxicos. Esta relación fisicoquímica hace que mapas de Mn disponible aporten información útil para interpretar variaciones locales de pH y sus efectos sobre la fertilidad.

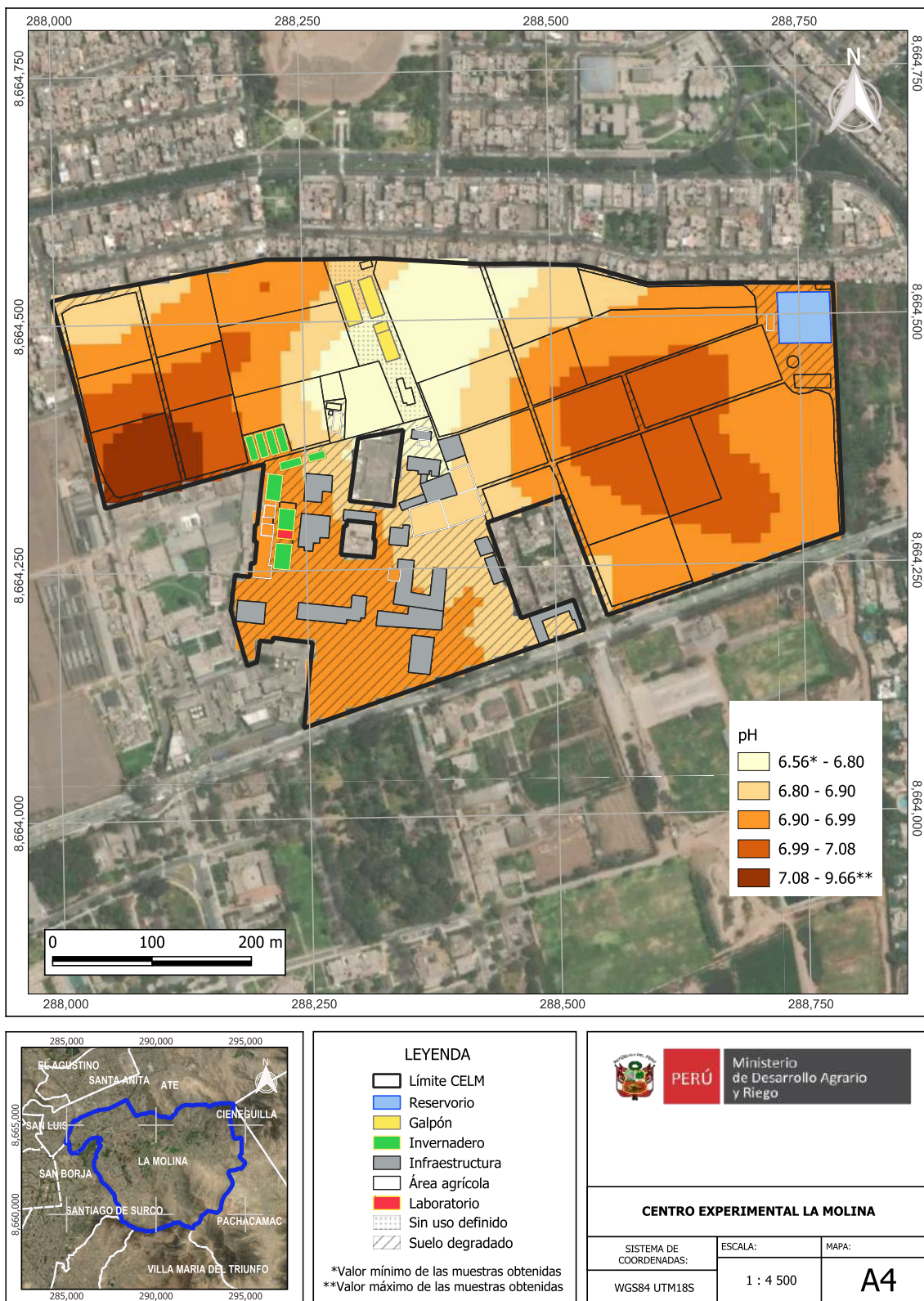


Figura 26. Mapa de variación espacial del pH

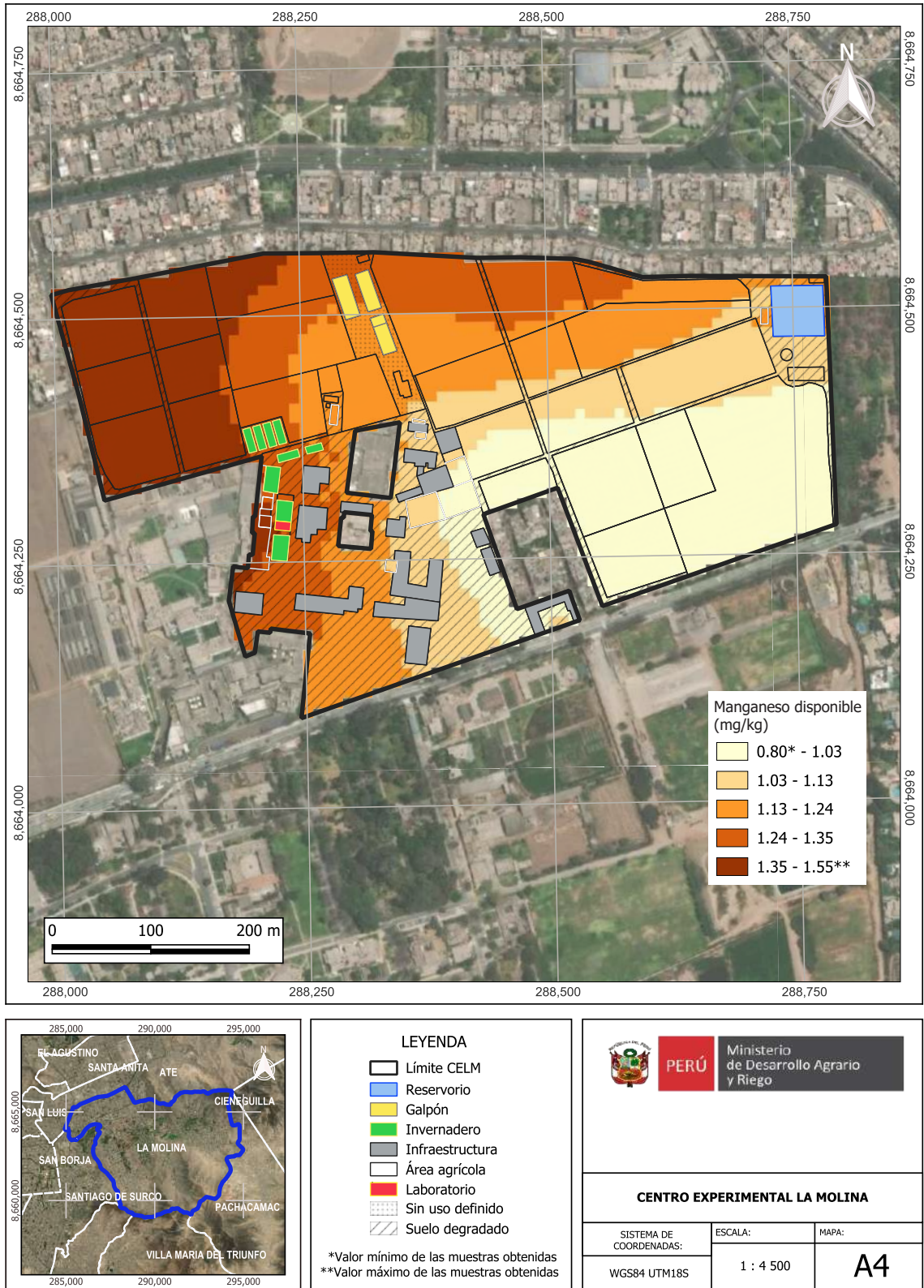


Figura 27. Mapa de variación espacial de la concentración de manganeso (Mn) disponible





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.
- Alghamdi, A. G., Majrashi, M. A., y Ibrahim, H. M. (2024). Improving the physical properties and water retention of sandy soils by the synergistic utilization of natural clay deposits and wheat straw. *Sustainability*, *16* (1), 46. <https://doi.org/10.3390/su16010046>
- Alloway, B. J. (Ed.). (2008). *Micronutrient deficiencies in global crop production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7>
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tinguavita, 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.
- Ayers, R. S., y Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/3/t0234e/T0234E00.htm>
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bray, R. H. (1958). The correlation of a phosphorus soil test with the response of wheat through a modified Mitscherlich equation. *Soil Science Society of America Journal*, *22*(4), 314–317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200040013x>
- Brock, C., Jackson-Smith, D., Kumarappan, S., Culman, S., Doohan, D., y Herms, C. (2021). The prevalence and practice of soil balancing among organic corn farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *36*(4), 1–10. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000381>
- 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/sssaspepub51.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/>

- 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>
- 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>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9a5b9373-3558-43b3-b732-f69326a7314d/content>
- Gamboa, N. R., Marchese, A. B., y Tavares-Corrêa, C. H. (2020). Salinization in Peruvian north coast soils: Case study in San Pedro de Lloc. En E. Taleisnik y R. S. Lavado (Eds.), *Saline and Alkaline Soils in Latin America* (pp. 141–159). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7_7
- 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.
- 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.
- Heuvelink, G. B. M., y Webster, R. (2022). Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure. *Spatial Statistics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100639>
- Hofman, P. J. (2007). *Optimising the postharvest quality of Hass avocado through improved calcium nutrition* (Final report of the project No. AV02009). Avocados Australia Ltd, Horticulture Australia Ltd, and the Department of Primary Industries and Fisheries. <https://www.horticulture.com.au/globalassets/hort-innovation/historic-reports/optimising-the-posharvest-qualities-of-hass-avocado-through-improved-calcium-nutrition-av02009.pdf>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- International Organization for Standardization. (1994). *Soil quality — Determination of specific electrical conductivity*.
- 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>
- Lowenberg-DeBoer, J., y Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111 (4), 1552-1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7–18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. En T. R. Peck, J. T. Cope Jr., y D. A. Whitney (Eds.), *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results* (pp. 39-54). *ASA Special Publications*. <https://doi.org/10.2134/asaspepub29.c3>
- McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M. L., y Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117 (1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- 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>
- Newett, S., McCarthy, A., Dirou, J., Miller, J., Hofman, P., Ireland, G., Pegg, K. G., Kernot, I., Searle, C., Ledger, S., Waite, G., y Vock, N. (2001). *Avocado Information Kit. Agrilink, your growing guide to better farming guide*. (Manual). Department of Primary Industries, Queensland Horticulture Institute. <https://era.dpi.qld.gov.au/id/eprint/1642/5/04-key-avo.pdf>
- 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., 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>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- 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>
- 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>
- Zhu, H., Zheng, B., Zhong, W., Xu, J., Nie, W., Sun, Y., y Guan, Z. (2024). Infiltration and leaching characteristics of soils with different salinity under fertilizer irrigation. *Agronomy*, 14 (3), 553. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030553>



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



Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios



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



Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-241-4



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPerú