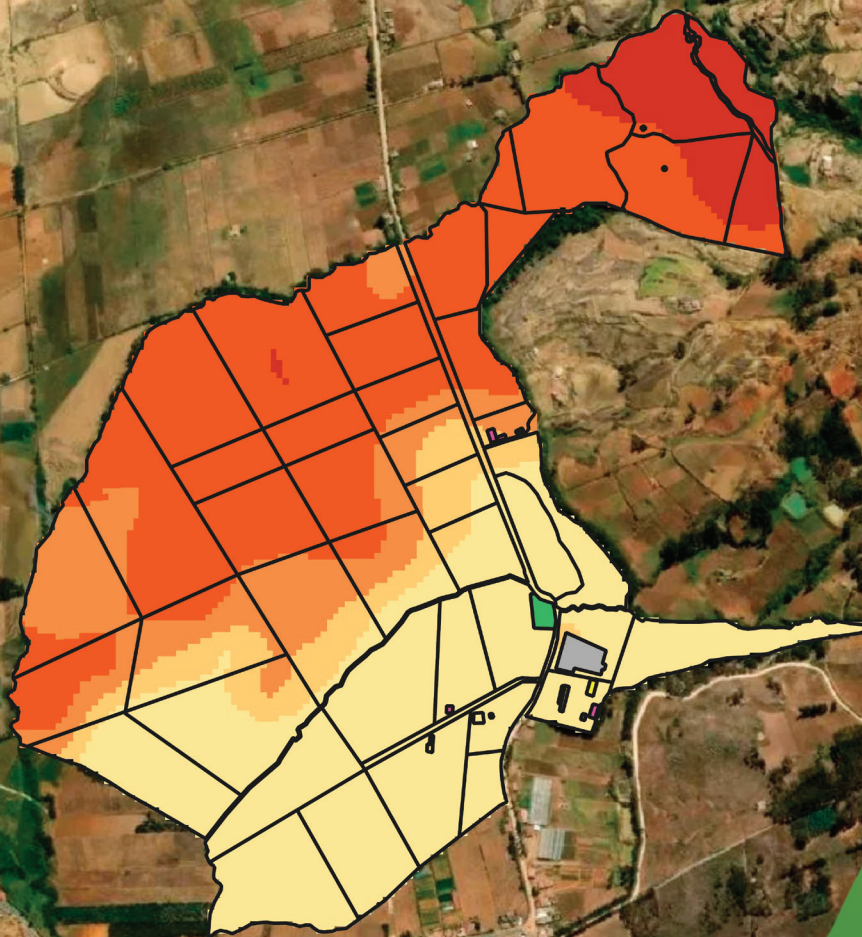


Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Baños del Inca



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESTRATÉGICOS AGRARIOS

Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Baños del Inca



VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA EEA BAÑOS DEL INCA

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:

978-9972-44-242-1

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° 2026-01775

Autores: Kenyi R. Quispe-Matos, Carlos M. Carbajal-Llosa, Sharon Y. Mejia-Maita, Rodolfo J. Chuchon-Reimon, Albert E. Fernandez-Puquio, Azucena Chávez Collantes, Cledy Ureta-Sierra, Richard A. Solórzano-Acosta, Juancarlos A. Cruz-Luis / **Editora general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Anthony L. Peralta-Guzmán / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante

Tabla de contenido

Presentación	7
1. Introducción	9
2. Principios fundamentales del análisis de suelos	11
2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos	11
2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas	11
2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes	14
2.1.3. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes	21
2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo	23
3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Baños del Inca	25
3.1. Ubicación de la EEA Baños del Inca	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	29
3.5. Geoestadística: metodología para el mapeo de las propiedades del suelo	30
3.6. Análisis de autocorrelación espacial: cómputo del índice de Moran	31
3.7. Interpolación <i>kriging</i> y validación cruzada con indicadores geoestadísticos	32
3.7.1. Generación y ajuste del variograma	32
3.7.2. Interpolación <i>kriging</i>	32
3.7.3. Validación cruzada	32
3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo	34
4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Baños del Inca	39
4.1. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles	39
4.1.1. Fertilización de construcción para incrementar el P disponible	39
4.1.2. Zonificación del potasio disponibles y fertilización de suficiencia	40
4.2. El pH del suelo	42
5. Referencias bibliográficas	45



Presentación

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

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

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

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

M. Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal

Presidente Ejecutivo

Instituto Nacional de Innovación Agraria



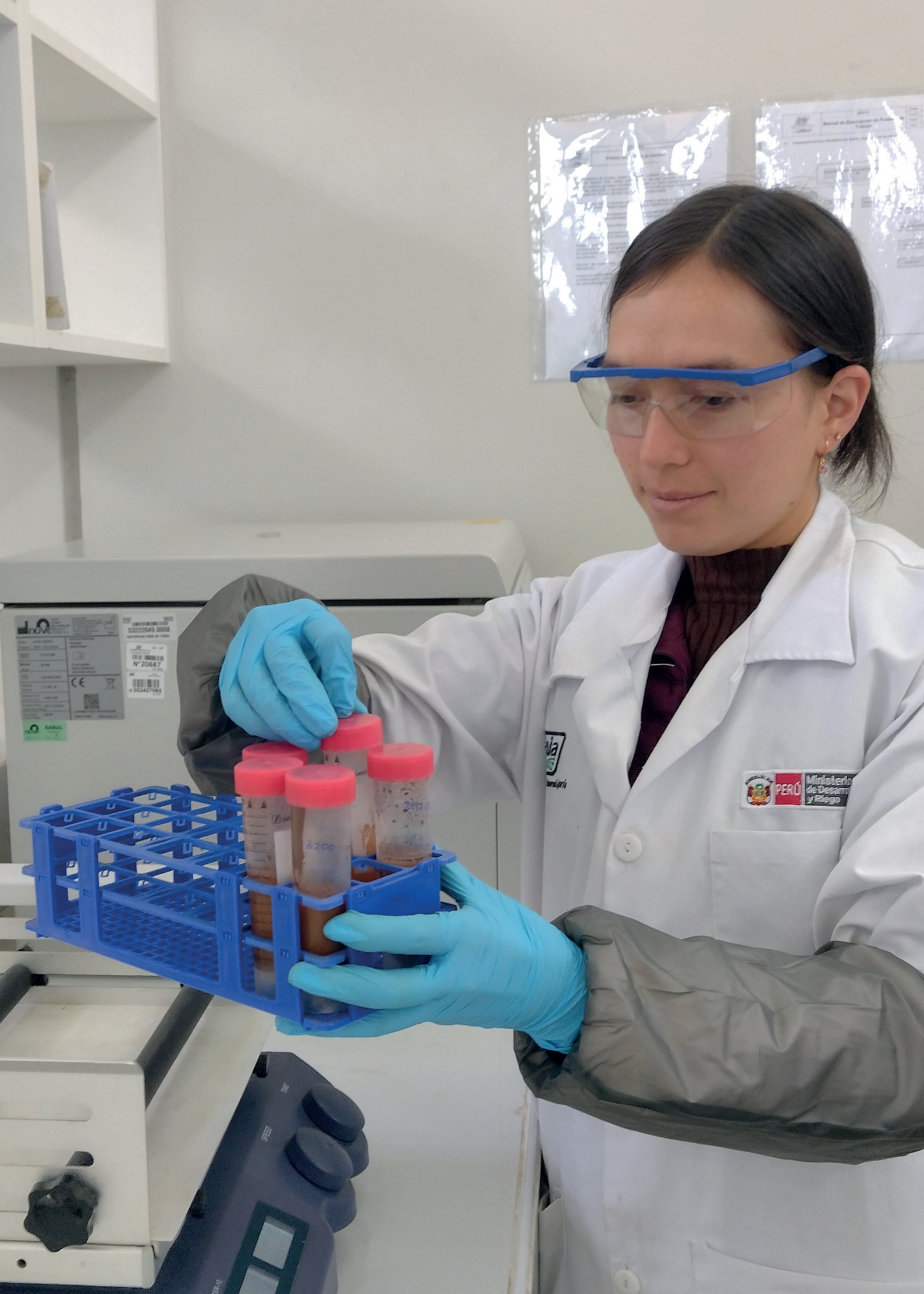
1. Introducción

El suelo es un componente esencial de la producción agrícola, dado que provee el soporte físico y los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos (Labrador, 2008). Una gestión adecuada permite mantener la productividad, conservar los recursos naturales y contribuir a la seguridad alimentaria (Burbano-Orjuela, 2016). Sin embargo, en diversas regiones del país, particularmente en la región andina, persisten procesos de degradación del suelo y un limitado conocimiento de su fertilidad, lo que dificulta su manejo eficiente.

La degradación de los suelos en las regiones andinas del Perú se ve agravada por la alta variabilidad espacial del clima y de la fertilidad del suelo, así como por el inadecuado manejo del recurso edáfico. Estos factores dificultan el uso eficiente de fertilizantes y provocan impactos negativos, como la sobredosificación de enmiendas cuando se aplican de forma uniforme (Quispe et al., 2024). La erosión constituye uno de los principales procesos de degradación de suelos a nivel mundial, afectando directamente la fertilidad (Feeney et al., 2023, citando a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO] y al Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos [GTIS], 2015). En la zona andina de la región Cajamarca, esta problemática se manifiesta con alta intensidad, dado que la pérdida de la capa superficial reduce la capacidad productiva de las áreas agrícolas. La remoción de partículas finas y materia coloidal disminuye la retención de humedad y la disponibilidad de fósforo y potasio, además de exponer horizontes subsuperficiales menos fértiles y, en algunos casos, más ácidos o pedregosos (Bertol et al., 2004). En zonas de ladera cultivadas intensivamente, como ocurre en buena parte de las provincias de Jaén y San Ignacio (40 % de la superficie agrícola de Cajamarca), la erosión se intensifica por el laboreo y la escasa cobertura vegetal, generando áreas con suelos empobrecidos y heterogéneos (Mora-Rodríguez y Sernaque-Guarniz, 2019). Esta dinámica no solo incrementa la variabilidad espacial de la fertilidad, sino que también obliga a un mayor uso de fertilizantes, muchas veces aplicados de manera generalizada y poco eficiente, lo que a su vez incrementa el riesgo de degradación a largo plazo.

En este contexto, la ausencia de herramientas técnicas que permitan una interpretación espacial precisa de las propiedades fisicoquímicas del suelo limita la toma de decisiones en el manejo de la fertilización de cultivos. Frente a esta problemática, el manual para el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Baños del Inca está dirigido a la implementación de estrategias de agricultura de precisión aplicadas a la fertilización, mediante la integración de enfoques de geoestadística, análisis de suelos y sistemas de información geográfica. Para ello, se emplean herramientas como la interpolación por *kriging*, el índice de Moran y el análisis de variogramas, cuya aplicación permite generar información clave para el diseño de estrategias de fertilización diferenciadas por zonas, optimizando el uso de insumos agrícolas y contribuyendo a la conservación de la salud del suelo a largo plazo (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021).

El presente documento tiene como objetivo evaluar la fertilidad del suelo y su variación espacial en la Estación Experimental Agraria Baños del Inca, con la finalidad de generar información práctica que sirva de apoyo para la planificación de las actividades agrícolas y el fortalecimiento de los sistemas productivos de la estación. A través de este documento se busca conocer el estado actual de la fertilidad del suelo e identificar sus principales limitantes; elaborar mapas que muestren las diferencias en la calidad del suelo dentro de la estación; y proponer estrategias de manejo de la fertilidad que permitan un uso más eficiente de fertilizantes y enmiendas, mejorar la productividad de los cultivos y promover la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y pecuarios.



2. Principios fundamentales del análisis de suelos

2.1. Sistemas de interpretación del análisis de suelos

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

2.1.1. Índice de saturación de bases catiónicas

a. Concepto

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

b. Origen y aplicabilidad del concepto

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

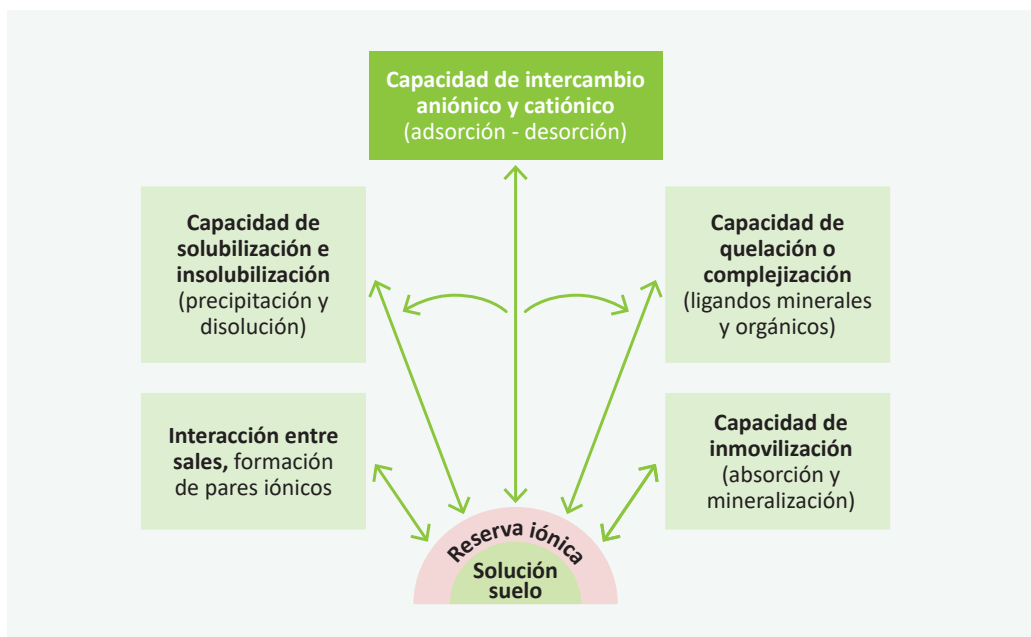


Figura 1. Mecanismos que mantienen en equilibrio los iones en la solución suelo (adaptado de McLean, 1977)

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

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

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

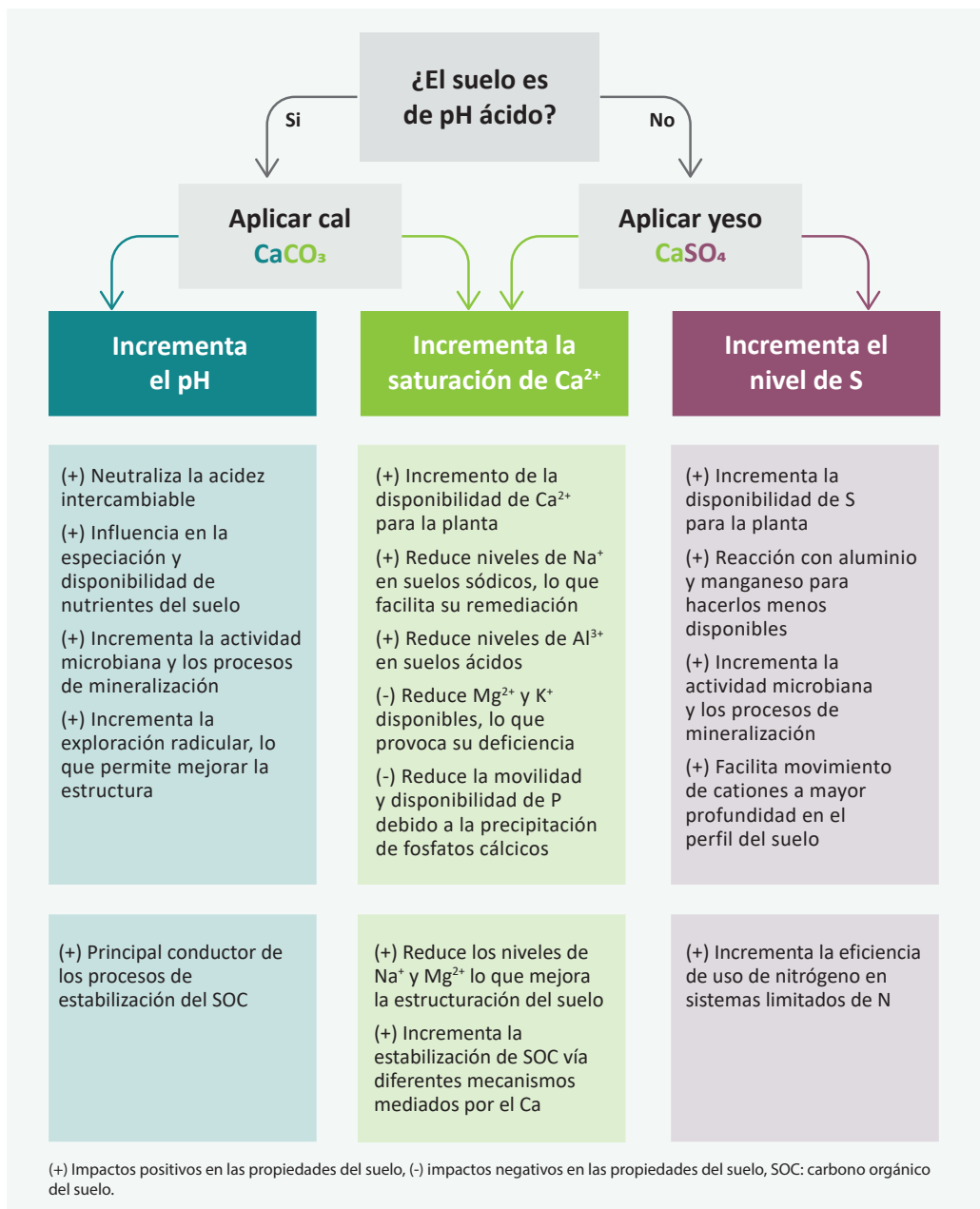


Figura 2. Criterios de uso de la cal y el yeso, y su respuesta en la relación de saturación de cationes básicos (adaptado de Culman et al., 2021)

2.1.2. Sistema de suficiencia de nutrientes

a. Concepto

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

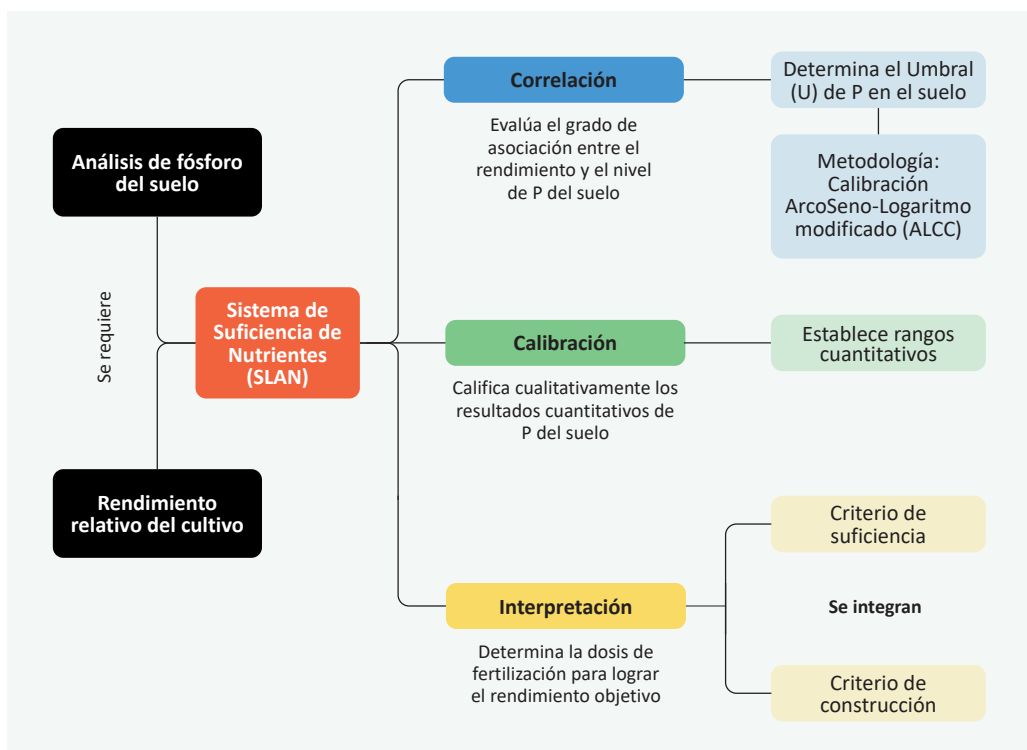


Figura 3. Esquema modelo para la implementación del sistema de suficiencia de nutrientes para el fósforo del suelo

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

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

b. Aplicación del criterio de suficiencia

El criterio de suficiencia se aplica cuando el análisis de suelos indica un contenido alto de nutriente, 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 papa, considerando un suelo con alto contenido de este nutriente.

Ejemplo práctico:

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 80 %.

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

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

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

Este resultado indica que el nivel actual de P (15 mg kg⁻¹) está por debajo del umbral crítico (18 mg kg⁻¹), lo que limita el rendimiento a solo el 80 % del potencial, 24 t ha⁻¹ en lugar de 30 t ha⁻¹.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 32.4 \text{ t ha}^{-1} = 81 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

A partir de estos resultados, se interpreta que el criterio de suficiencia estima un requerimiento de 81 kg de P ha⁻¹ para alcanzar un rendimiento objetivo de 32.4 t ha⁻¹, el cual está conformado por 8.4 t ha⁻¹ de biomasa radicular y vegetativa, y 24 t ha⁻¹ de producción.

c. Aplicación de los criterios de mantenimiento y construcción

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

Con respecto a los criterios de mantenimiento y construcción, se aplica cuando el nutriente se encuentra en niveles muy bajos en el suelo. El objetivo no es sólo cubrir la extracción de nutriente por el cultivo y ajustar según su eficiencia, sino también incrementar o construir progresivamente el nivel del nutriente en el suelo hasta alcanzar valores cercanos al nivel crítico, asegurando así una fertilidad sostenida en el tiempo. Alternativamente, el criterio de construcción se puede aplicar para complementar los requerimientos de nutriente estimados para la fertilización de suficiencia y mantenimiento (García y Ciampitti, 2010).

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

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

A continuación, se presentarán ejemplos prácticos en el cultivo de papa haciendo uso del criterio de mantenimiento, y criterios de mantenimiento y construcción.

Ejemplo práctico (Criterio de mantenimiento)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 50 %.

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 20.25 \text{ t ha}^{-1} = 50.63 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

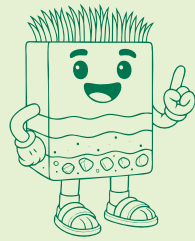
$$\text{RM de P} = \frac{50.63 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.30} = 168.77 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento de fósforo en el cultivo de papa es 168.77 kg por hectárea.

Ejemplo práctico (criterio de mantenimiento y construcción)

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

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 18 mg de P-Bray 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-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 30 %.



Nota:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Requerimiento de P} = 2.5 \text{ kg de P t}^{-1} \times 12.15 \text{ t ha}^{-1} = 30.38 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de P} = \frac{30.38 \text{ kg de P ha}^{-1}}{0.20} = 151.90 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 12 kg de P por hectárea para incrementar 1 mg de P por kg de 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.

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

$$RC = 1.5 \text{ mg de P kg}^{-1} \times \frac{12 \text{ kg de P ha}^{-1}}{1 \text{ mg de P kg}^{-1}} = 18 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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

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

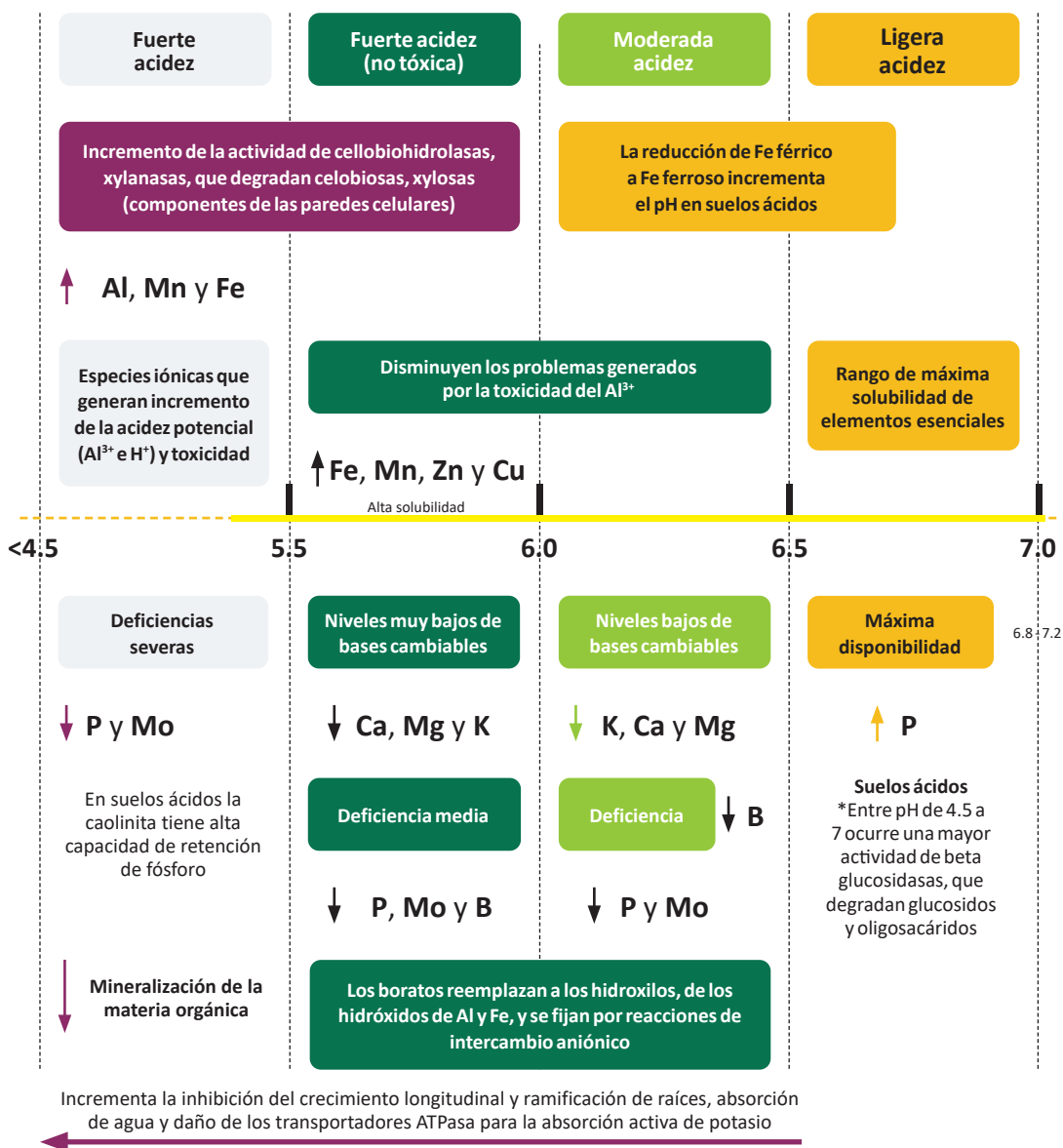
$$\text{Dosis de fertilización de P} = 151.90 \text{ kg de P ha}^{-1} + 18 \text{ kg de P ha}^{-1} = 169.90 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, el requerimiento de mantenimiento y construcción de fósforo en el cultivo de papa es 169.90 kg por hectárea.

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

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

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



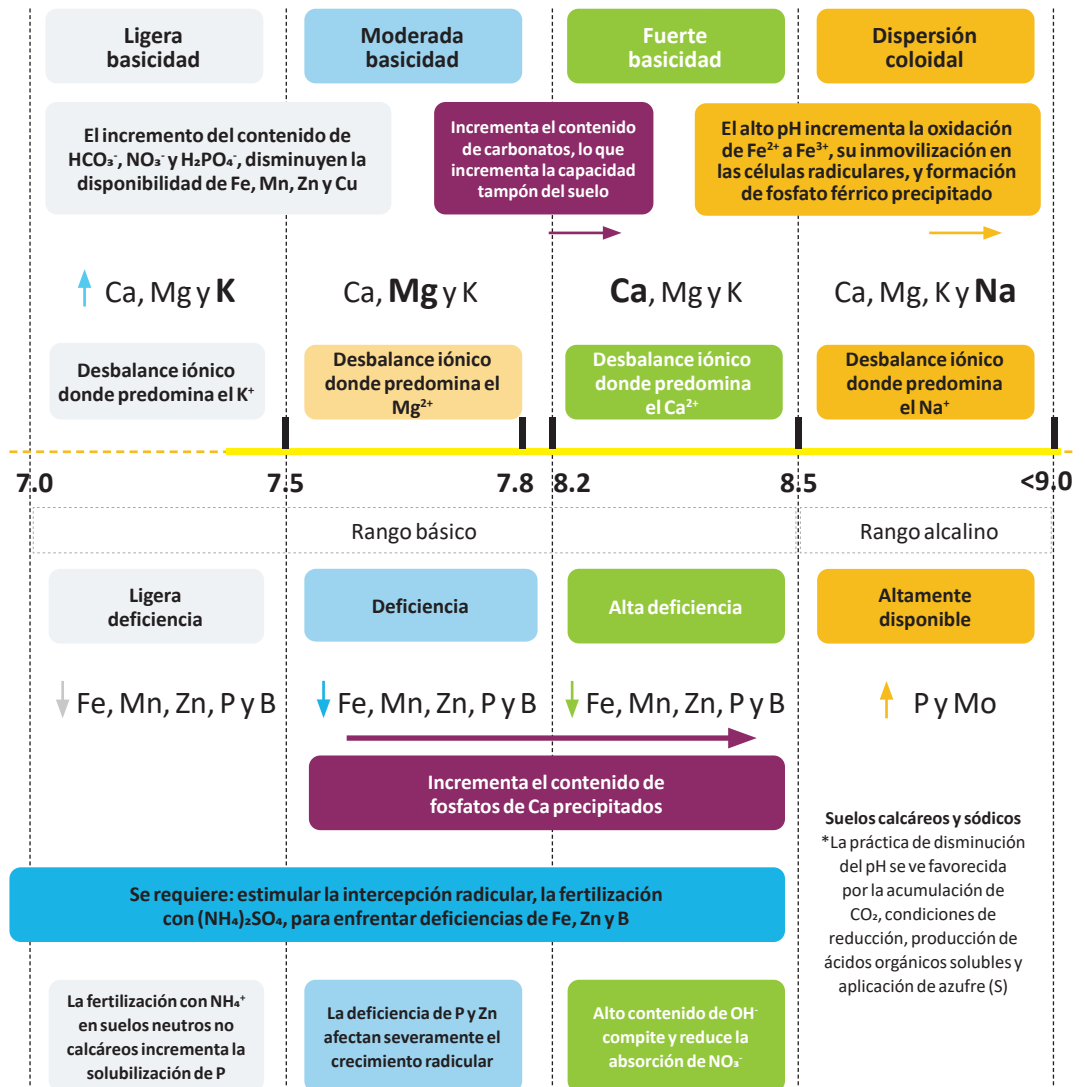


Figura 4. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en función al pH

2.2. Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

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

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



3. Muestreo y análisis de suelos en la EEA Baños del Inca

3.1. Ubicación de la EEA Baños del Inca

La EEA Baños del Inca presenta suelos de tipo Regosol éútrico-Cambisol éútrico, los cuales se han desarrollado a partir de materiales no consolidados y sedimentos aluviales antiguos (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1996). Además, cuenta con cinco centros experimentales con una extensión total de 190.89 ha, siendo los cultivos priorizados: papa (*Solanum tuberosum* L.), maíz (*Zea mays* L.), quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.), ryegrass (*Lolium perenne* L.), avena (*Avena sativa* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

En la estación 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 Cajamarca. El estudio se realizó en el Centro Experimental Cochamarca, el cual se encuentra en el distrito de Gregorio Pita, provincia de San Marcos, departamento de Cajamarca (Figura 5), a 2250 m s. n. m. (Cruz-Luis et al., 2025).

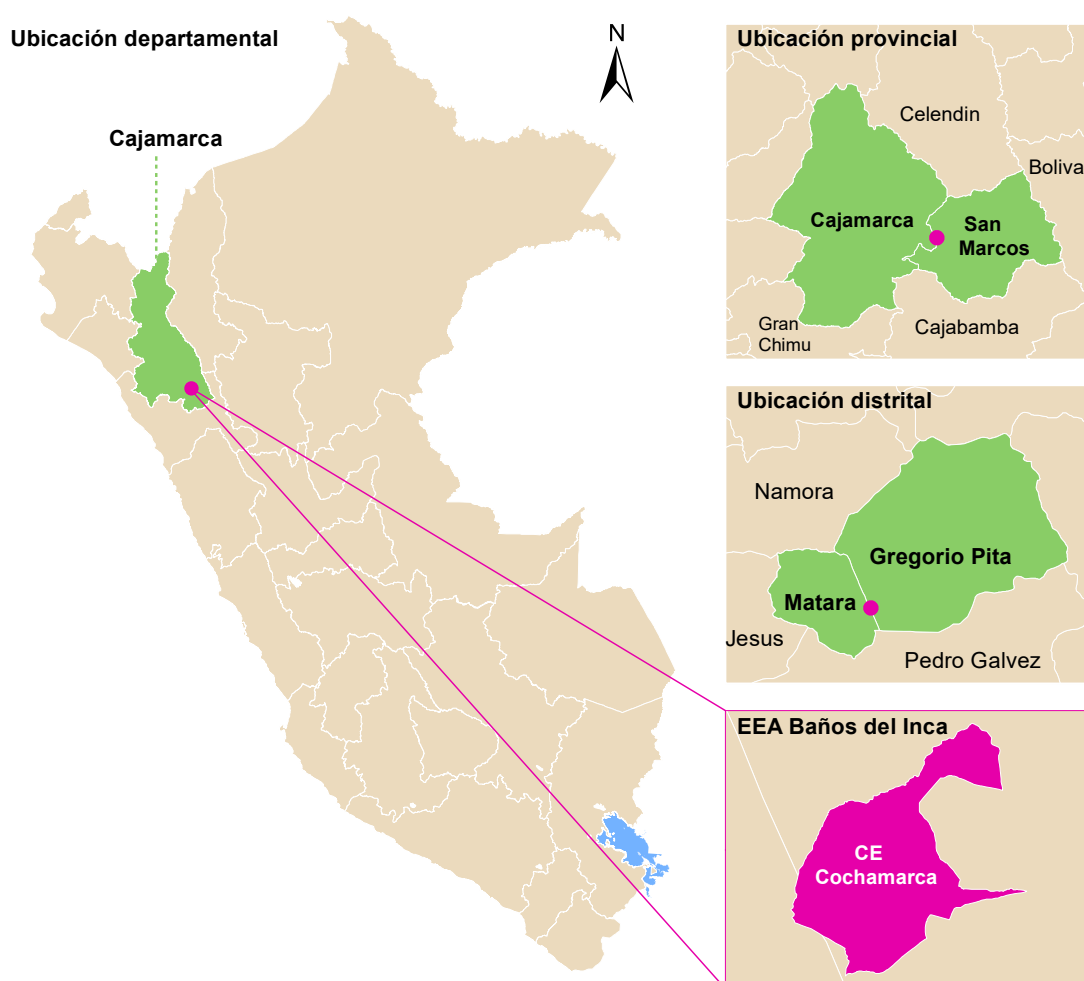


Figura 5. Ubicación del Centro Experimental Cochamarca de la EEA Baños del Inca

3.2. Muestreo estratificado del suelo

Con el objetivo de obtener una representación espacial adecuada de las condiciones edáficas en Centro Experimental Cochamarca de la EEA Baños del Inca, 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).

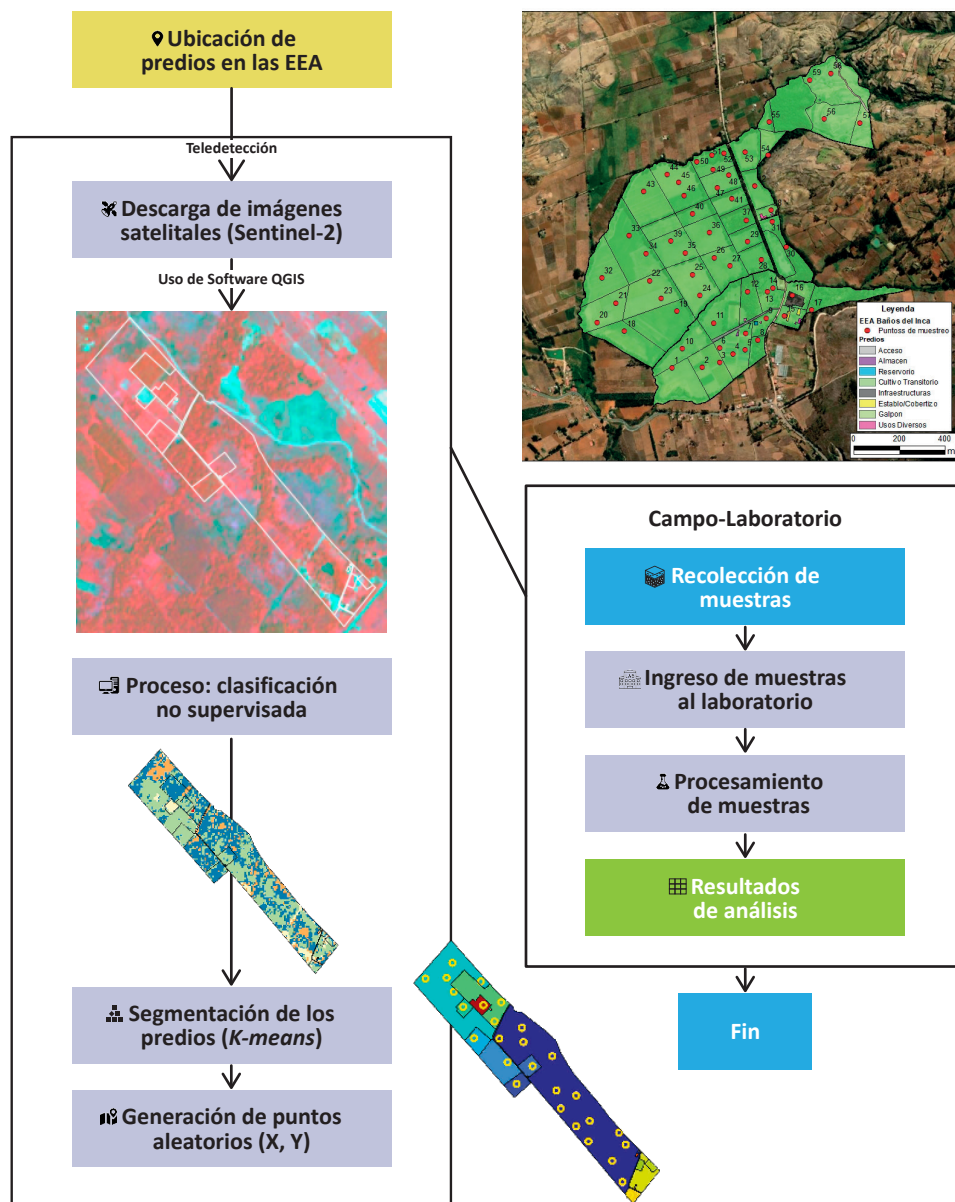


Figura 6. Flujo de trabajo para la determinación de los puntos de muestreo

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

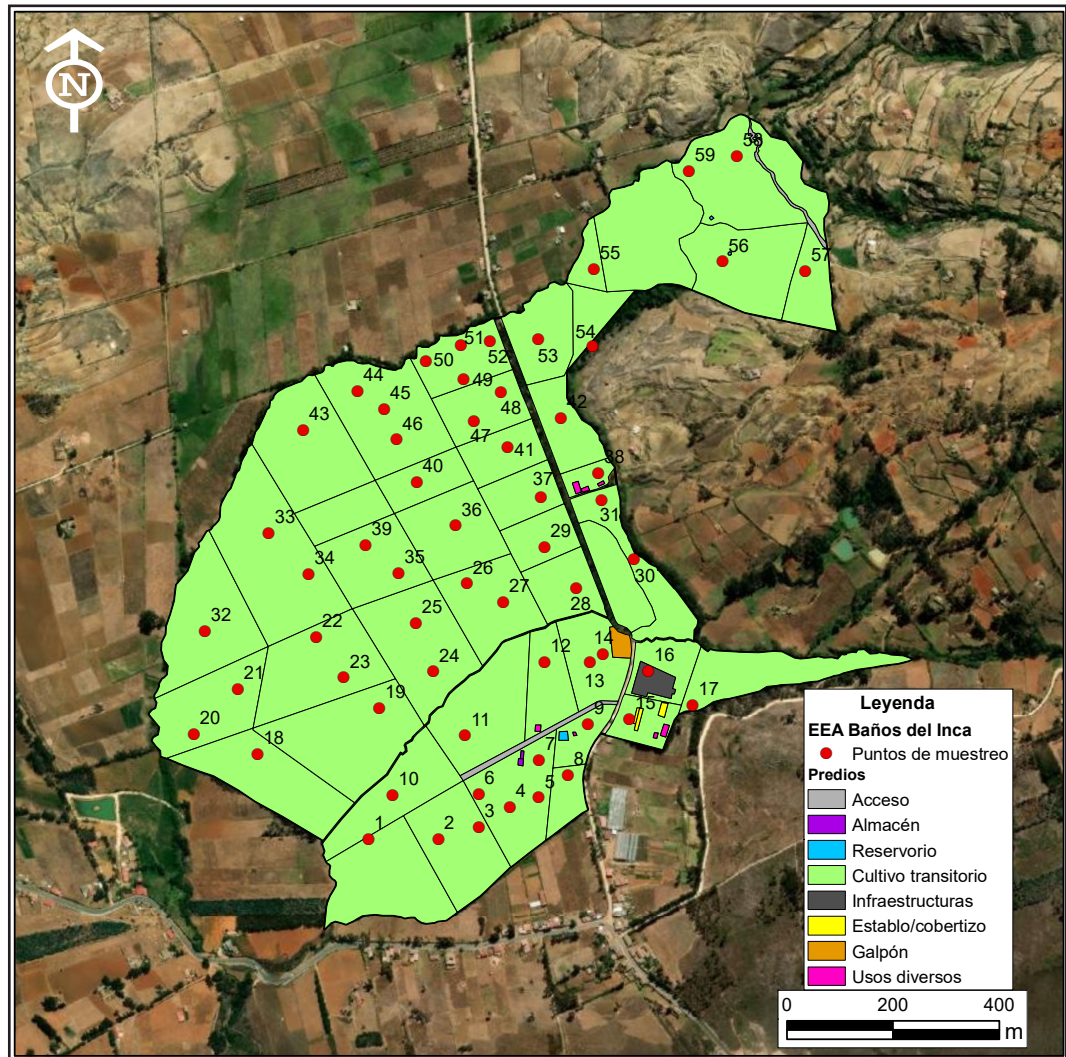


Figura 7. Puntos de muestreo de suelos en la EEA Baños del Inca

3.2.2. Muestreo de suelos en los puntos identificados

Luego de identificar las coordenadas de los 59 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, estas deben ser llevadas a un laboratorio de análisis de suelos, preferentemente que cuente con métodos acreditados. En este trabajo, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliar de la EEA Baños del Inca para su procesamiento. El primer pretratamiento realizado fue el secado de las muestras a temperatura de 35 °C durante 48 horas. Posteriormente, se procedió con los análisis correspondientes (Tabla 1).

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

Parámetro	Método de análisis	Referencias
pH (1:2.5)	Método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Environmental Protection Agency (EPA, 2004)
Materia orgánica (MO)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método de Walkley y Black	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002)
K disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000	SEMARNAT (2002)
P disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Método Bray y Kurtz	SEMARNAT (2002)

3.4. Resultados de los análisis de suelos

Los resultados de la caracterización química de los suelos en la EEA Baños del Inca (Tabla 2) muestran que el pH es moderadamente ácido en promedio (5.89 ± 1.07 , CV = 18 %), con valores que varían entre 3.50 y 7.20. Esta amplitud indica la coexistencia de sectores fuertemente ácidos, donde podrían presentarse limitaciones por toxicidad de aluminio y baja disponibilidad de nutrientes, junto con áreas más cercanas a la neutralidad. La mediana (6.20) revela que una proporción importante de los suelos mantiene condiciones ligeramente ácidas a casi neutras, más favorables para la mayoría de los cultivos.

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

Variable	Unidad	Media	SD	Mediana	Mínimo	Máximo
pH	und	5.89	1.07	6.20	3.50	7.20
MO	%	2.97	1.12	2.94	0.28	5.32
P disp.	mg kg ⁻¹	14.80	9.70	12.40	0.46	45.32
K disp.	mg kg ⁻¹	274.58	53.48	290.00	155.00	340.00

SD: desviación estándar, MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible.

El contenido de materia orgánica ($2.97 \% \pm 1.12$, CV = 38 %) es moderado en promedio, aunque con rangos que van desde valores muy bajos (0.28 %) hasta niveles relativamente buenos (5.32 %). Esta variabilidad refleja la influencia de las condiciones locales de uso del suelo y prácticas de manejo, sugiriendo que en varios sectores se requiere incrementar el aporte de residuos y enmiendas orgánicas para mejorar la fertilidad biológica.

En cuanto a la fertilidad química, los niveles de fósforo disponible ($14.80 \text{ mg kg}^{-1} \pm 9.70$, CV = 65 %) son bajos a moderados en promedio, pero con una alta variabilidad y presencia de valores extremos que alcanzan hasta 45.32 mg kg^{-1} . Esto sugiere que, mientras en algunos sectores podría existir deficiencia marcada de fósforo, en otros hay una mayor acumulación, probablemente asociada a aplicaciones localizadas de fertilizantes fosfatados.

El potasio disponible presenta un promedio alto ($274.58 \text{ mg kg}^{-1} \pm 53.48$, CV = 19 %), con una mediana cercana al promedio ($290.00 \text{ mg kg}^{-1}$), lo que indica una distribución relativamente homogénea y adecuada para el crecimiento vegetal. Los valores registrados ($155\text{-}340 \text{ mg kg}^{-1}$) se ubican en un rango que asegura un buen abastecimiento de este macronutriente esencial.

En conjunto, los suelos evaluados se caracterizan por una reacción ácida a ligeramente ácida, niveles moderados de materia orgánica, disponibilidad de fósforo heterogénea y una adecuada oferta de potasio. Estas condiciones sugieren la necesidad de manejo focalizado en la corrección de la acidez en sectores críticos, el fortalecimiento del contenido de materia orgánica y la aplicación estratégica de fósforo, mientras que el potasio no representa, en general, una limitación importante.

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

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

Requisitos previos para el mapeo:

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

Procedimiento:

- a. **Preparación de los datos:** asegurar que los datos de entrada (formato CSV, *shapefile*, u otro) contengan las coordenadas (X, Y) y los valores de la variable de interés (ej. porcentaje de materia orgánica). Asimismo, verificar que no existan valores nulos o erróneos. Existe la opción de que el complemento detecte valores atípicos, los represente en una previsualización del ploteo de puntos y los elimine para el análisis. Esta herramienta es opcional.
- b. **Análisis exploratorio de los datos:** realizar un análisis exploratorio de datos para obtener una visión general de las principales características del conjunto de datos. Para ello, calcular las 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.

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

3.7.1. Generación y ajuste del variograma

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

3.7.2. Interpolación *kriging*

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

3.7.3. Validación cruzada

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

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

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

Donde:

n: el número de muestras.

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

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

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

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

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.

Los resultados de la validación cruzada de las variables fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3, y se observa que tienen diferentes grados de dependencia espacial y capacidad predictiva. El pH y el potasio disponible evidenciaron la mejor relación entre valores observados y estimados ($R^2 = 0.68$ y 0.69 , respectivamente), lo que indica una estructura espacial bien definida y una baja variabilidad aleatoria, permitiendo generar mapas temáticos de alta confiabilidad para la toma de decisiones en campo. En contraste, la materia orgánica y el fósforo disponible presentaron bajos coeficientes de determinación ($R^2 = 0.25$ y 0.12 , respectivamente), lo que sugiere una alta heterogeneidad no explicada por los modelos geoestadísticos empleados, posiblemente asociada a factores de manejo agrícola, variaciones micro ambientales o limitaciones en la densidad de muestreo. Este comportamiento implica que, para estas variables, las interpolaciones deben interpretarse con cautela y, en el caso del fósforo, se recomienda un muestreo más intensivo y localizado para mejorar la precisión espacial y reducir el error cuadrático medio observado.

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

Variable	MODELO	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Cross-validation	
					RMSE	R^2
pH	<i>Linear to Sill</i>	0.00	1.81	792.72	0.60	0.68
MO	<i>Spherical</i>	0.05	1.34	403.64	1.01	0.25
P disp.	<i>Linear to Sill</i>	49.32	70.05	510.31	7.74	0.12
K disp.	<i>Linear to Sill</i>	26.11	4056.38	792.72	29.77	0.69

MO: materia orgánica del suelo, P disp.: fósforo disponible, K disp.: potasio disponible, RMSE: raíz del error cuadrático medio y R^2 : coeficiente de determinación.

En función de estos resultados, la elaboración de mapas digitales se centró en resaltar las variables con mayor grado de dependencia espacial y precisión predictiva, como el pH y el K disponible, cuya interpolación *kriging* mostró patrones consistentes y rangos de alcance amplios (792.72 m), lo que permite definir zonas homogéneas para la aplicación de enmiendas y fertilizantes. Por otro lado, para las variables con menor ajuste (MO y P disponible), si bien se generaron mapas representativos de la variación general, su uso debe considerarse como referencia exploratoria y complementarse con análisis puntuales de laboratorio antes de ejecutar intervenciones de manejo. Este enfoque integrado de geoestadística y mapeo digital constituye una herramienta clave para la agricultura de precisión en la EEA Baños del Inca, favoreciendo la asignación eficiente de insumos y la sostenibilidad de la fertilidad del suelo en el largo plazo.

3.8. Mapeo digital de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se han representado en los respectivos mapas interpolados (Figuras 9-12), mostrando la variación espacial de las características físicas y químicas de los suelos de la EEA Baños del Inca. Asimismo, entre las propiedades del suelo evaluadas, las características relacionadas con el pH y K disponible alcanzaron un mayor grado de ajuste entre los valores observados y predichos, siendo estos los de mayor predictibilidad espacial en un rango de 792.72 m.

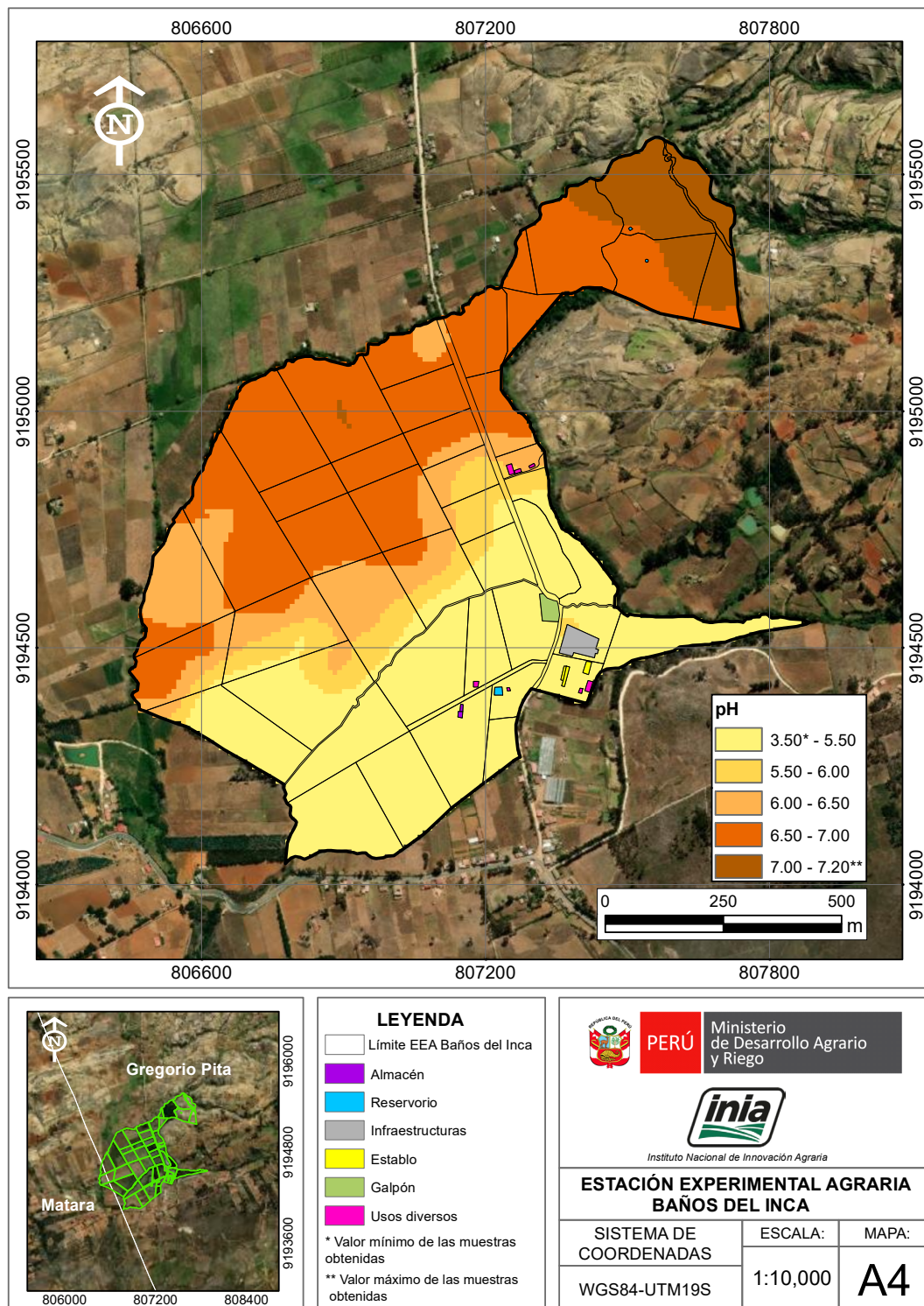


Figura 9. Mapa de variación espacial del pH

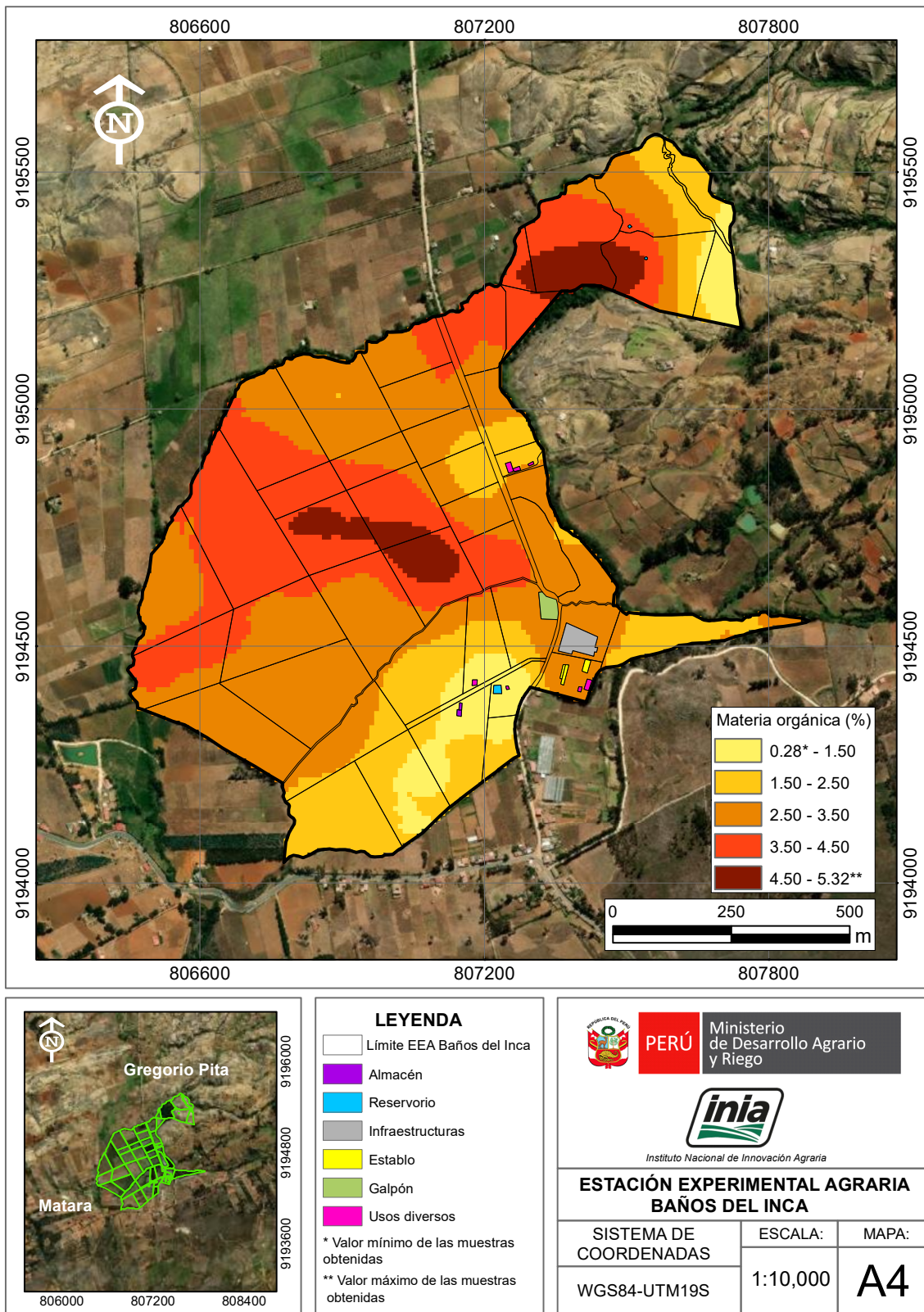


Figura 10. Mapa de variación espacial del porcentaje de materia orgánica

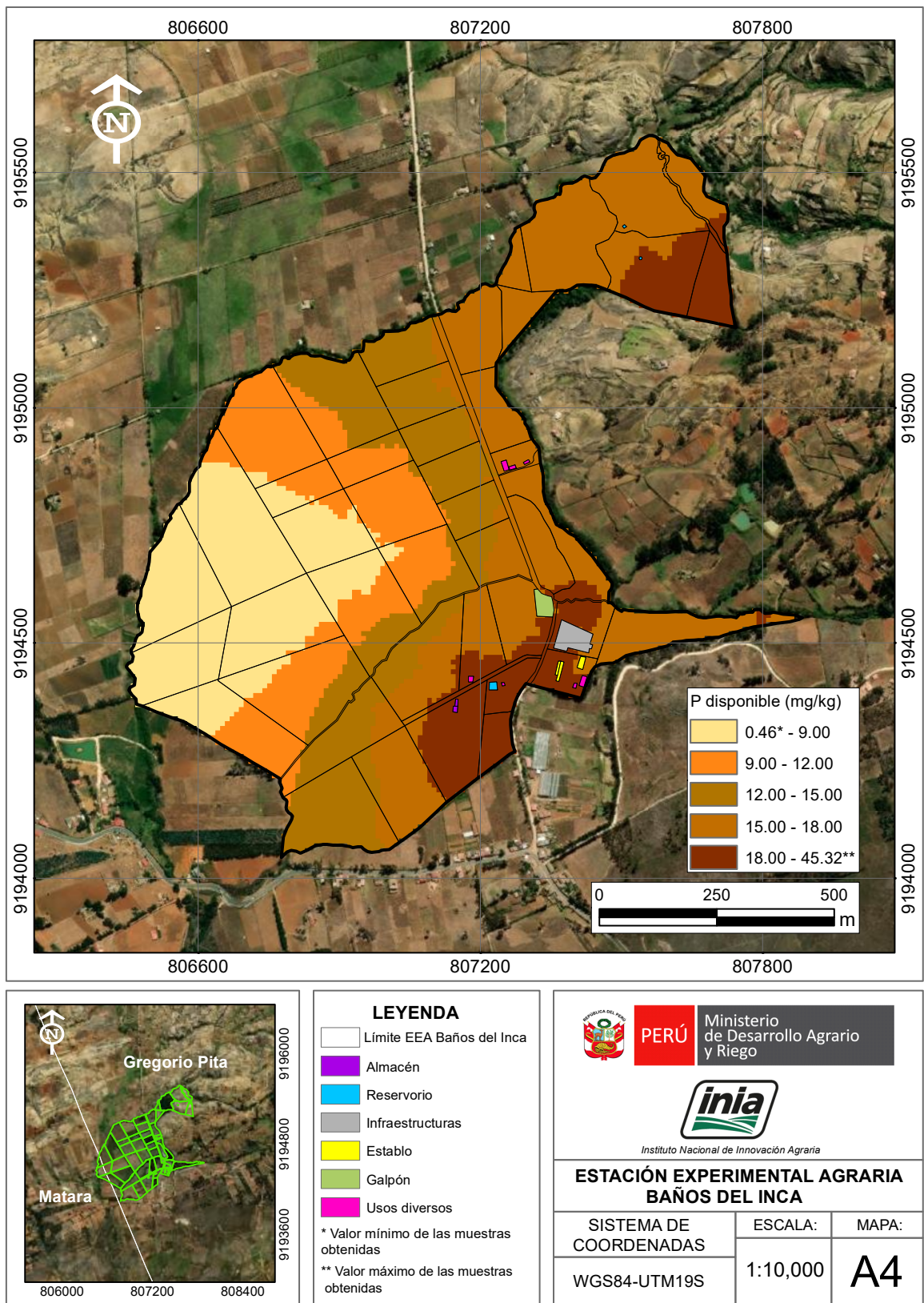


Figura 11. Mapa de variación espacial del fósforo disponible

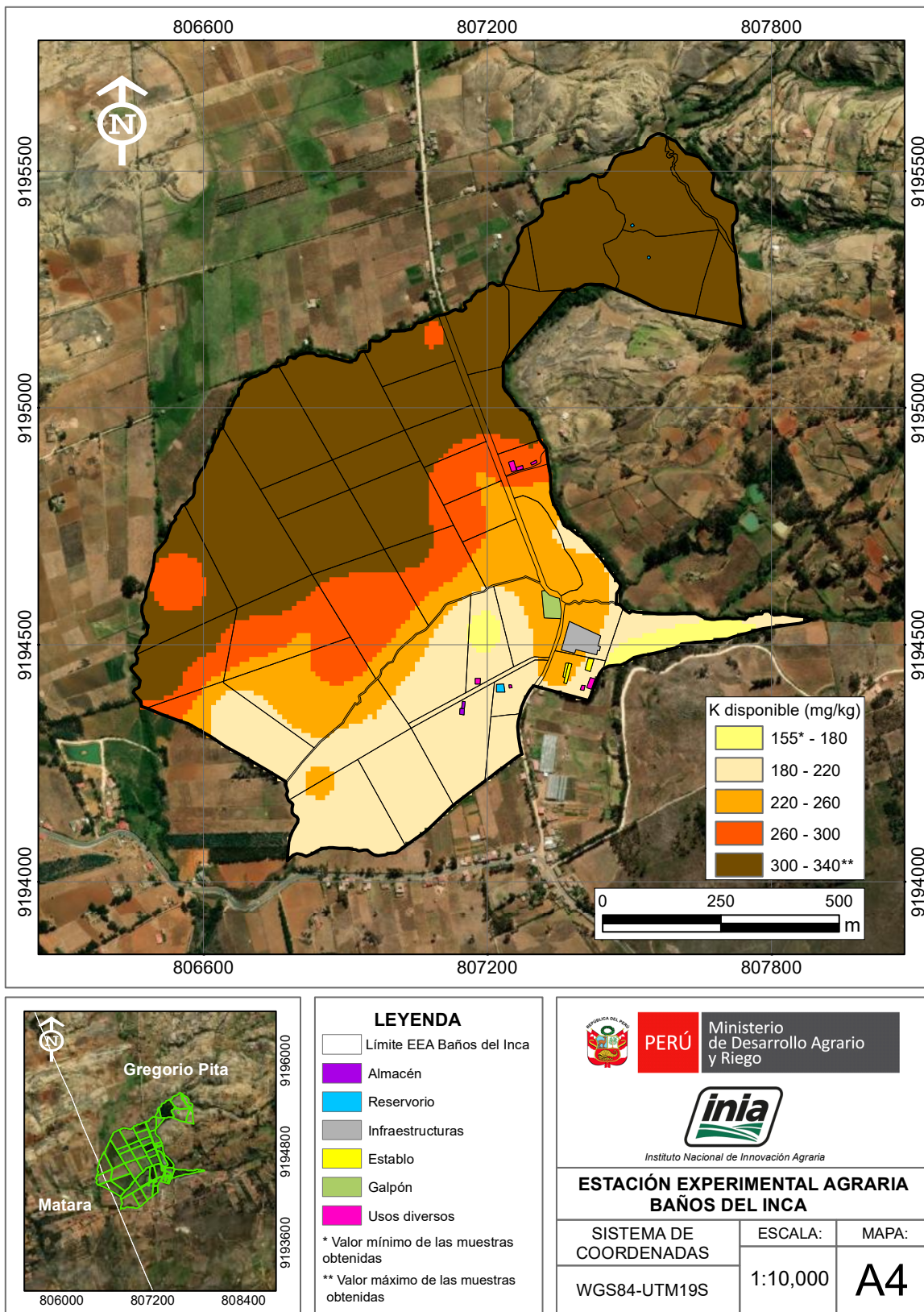


Figura 12. Mapa de variación espacial del potasio disponible



4. Recomendaciones de manejo de la fertilidad del suelo en la EEA Baños del Inca

4.1. Niveles de suficiencia de nutrientes disponibles

4.1.1. Fertilización de construcción para incrementar el P disponible

Los indicadores geoestadísticos del P disponible del suelo muestran que no hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 7.74 y $R^2 = 0.12$). Además, existe una alta variabilidad entre los valores de P del suelo con resultados entre 0.46 y 45.32 mg kg⁻¹ (Figura 11). Está marcada heterogeneidad espacial indica que en ciertas áreas el fósforo es limitante para el crecimiento vegetal, requiriendo fertilización fosfatada inmediata, mientras que en otras podría haber disponibilidad suficiente o incluso exceso, lo cual incrementa el riesgo de pérdidas por escorrentía debido a la erosión hídrica. De esta manera, el requerimiento de fertilización fosforada sólo es posible realizarlo mediante un análisis del suelo sitio-específico.

En este caso, se tomará como ejemplo el valor de P-Bray disponible de 0.46 mg kg⁻¹ (mínimo) para la estimación de la fertilización de mantenimiento y construcción en el cultivo de maíz morado.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 15 mg de P-Bray por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 12 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 0.46 mg de P-Bray por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 10 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 0.46 mg de P-Bray por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{10 \times 12 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 1.2 \text{ t ha}^{-1}$$

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 25 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.25 \times 1.2 \text{ t ha}^{-1} = 0.3 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 1.2 \text{ t ha}^{-1} + 0.3 \text{ t ha}^{-1} = 1.5 \text{ t ha}^{-1}$$

Cuarto paso: calcular el requerimiento de P utilizando la fórmula 5. Para este cálculo y con fines prácticos se considera una extracción de 4.8 kg de fósforo por tonelada de producción.

$$\text{Requerimiento de P} = 4.8 \text{ kg de P t}^{-1} \times 1.5 \text{ t ha}^{-1} = 7.2 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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 15 %.

$$\text{RM de P} = \frac{7.20 \text{ kg P ha}^{-1}}{0.15} = 48 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

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, y que el incremento anual requerido (IAR) en este ejemplo es de 1.5 mg de P por kg de suelo.

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

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

$$\text{Dosis de fertilización de P} = 48 \text{ kg de P ha}^{-1} + 13.5 \text{ kg de P ha}^{-1} = 61.50 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 306.16 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP). Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento de P del cultivo de maíz morado y se construye fósforo en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo.

4.1.2. Zonificación del potasio disponible y fertilización de suficiencia

Los indicadores geoestadísticos del K disponible del suelo muestran que hay un buen grado de ajuste entre los valores observados y los valores predichos a nivel espacial (RMSE = 29.77 y R² = 0.69). Presenta valores entre 155 a 340 mg kg⁻¹, con una media de 274.58 mg kg⁻¹, lo que indica un nivel adecuado a bueno para la mayoría de los cultivos. 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. El mapa de variación espacial del K disponible (Figura 12) permitió definir 5 zonas predominantes con diferentes niveles de potasio: nivel moderado (entre 155 a 180 mg kg⁻¹) en la zona 1 y (entre 180 a 220 mg kg⁻¹) en la zona 2, nivel alto (220 a 260 mg kg⁻¹) en la zona 3, nivel muy alto (260 a 300 mg kg⁻¹) en la zona 4 y nivel excesivo entre 300 a 340 mg kg⁻¹) en la zona 5. Estas diferencias permiten identificar que sólo en la zona 1 se requiere fertilización potásica de suficiencia, para lo cual se realizarán los cálculos para el cultivo de maíz morado.

Para este cultivo, el umbral crítico o nivel de suficiencia es de 200 mg de K por kg de suelo y el rendimiento potencial es de 12 t ha⁻¹. El análisis de correlación y calibración indica que el nivel obtenido de 160 mg de K por kg de suelo permite obtener un rendimiento relativo (RR) del 70 %.

Primer paso: calcular el rendimiento con 160 mg de K por kg de suelo, utilizando la fórmula 2:

$$\text{Rendimiento alcanzado} = \frac{70 \times 12 \text{ t ha}^{-1}}{100} = 8.4 \text{ t ha}^{-1}$$

Segundo paso: hallar el incremento de raíces y brotes utilizando la fórmula 3. Para este cálculo y con fines prácticos considera que este incremento es el 25 % del rendimiento alcanzado.

$$\text{Incremento de raíces y brotes} = 0.25 \times 8.4 \text{ t ha}^{-1} = 2.1 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Rendimiento objetivo} = 8.4 \text{ t ha}^{-1} + 2.1 \text{ t ha}^{-1} = 10.5 \text{ t ha}^{-1}$$

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

$$\text{Requerimiento de K} = 20 \text{ kg de K t}^{-1} \times 10.5 \text{ t ha}^{-1} = 210 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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 %.

$$\text{RM de K} = \frac{210 \text{ kg de K ha}^{-1}}{0.70} = 300 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

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.

$$\text{Dosis de fertilización de K} = 300 \text{ kg de K ha}^{-1} + 40 \text{ kg de K ha}^{-1} = 340 \text{ kg de K ha}^{-1}$$

De esta manera, la dosis de fertilización anual sería de 680 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio. Con esta dosis de fertilización se abastece el requerimiento de K del cultivo de maíz morado y se construye potasio en el suelo para sostener el rendimiento a largo plazo.

Por otro lado, es importante considerar que en los suelos con niveles muy altos y excesivos de potasio disponible (zona 4 y 5) es posible que ocurran desequilibrios catiónicos, en desmedro de los niveles de magnesio y calcio, lo que se debe tener en cuenta en la interpretación de análisis complementarios de cationes básicos. Además, se debe tener en consideración el análisis de la CIC total del suelo, para evaluar si el alto nivel de K en estas zonas coincide con altos niveles de Mg²⁺ y Ca²⁺, debido a una elevada fertilidad potencial de los suelos.

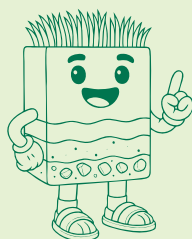
4.2. El pH del suelo: modulador de la solubilidad de nutrientes

Los indicadores geoestadísticos para el pH del suelo resultaron en un valor de *Nugget* (C_0) muy bajo (0.00), lo que demuestra una baja variabilidad a microescala, es decir, el pH del suelo no cambia a corta distancia. Por su parte, el *Sill* ($C_0 + C$) también muestra valores moderados (1.81), lo que indica que a medida que incrementa la distancia sigue habiendo una baja variabilidad del pH del suelo. Asimismo, el RMSE del pH presentó un valor bajo, con un error o desviación promedio en las predicciones de ± 0.60 , lo que evidencia que el modelo de predicción espacial tiene un alto grado de ajuste con la variación espacial de los valores predichos. El modelo presenta un buen ajuste ($R^2 = 68\%$), por lo que el pH presenta una estructura espacial fuerte y continua. No hay variación aleatoria a escala pequeña, lo que sugiere que el muestreo fue adecuado y que el pH está bien representado en el área. Por lo mismo, el mapa de variación espacial del pH muestra 5 zonas diferenciadas (Figura 9): La zona 1, fuertemente ácido (3.50 a 5.50); zona 2, moderadamente ácido (pH entre 5.5 y 6.0); zona 3; ligeramente ácido (pH entre 6.0 a 6.5), zona 4; neutros (pH entre 6.5 a 7.0); y zona 5; ligeramente básicos (7.0 a 7.20). Estas diferencias permiten identificar la zonificación del requerimiento de encalado. El cálculo de la cantidad de cal necesario se puede realizar a partir de los valores de pH y materia orgánica (Teixeira et al., 2020, citando a Defelipo et al., 1972), tal como se señala en la Fórmula 12.

La fórmula para estimar la dosis de cal (RC) en $t\ ha^{-1}$ sería la siguiente:

$$RC = 0.16 \times (6 - pH) \times MO \quad \dots (12)$$

Este enfoque permite calcular las dosis de encalado a partir del pH y la materia orgánica del suelo, prescindiendo de variables de acidez potencial como el Al^{3+} e H^+ , y resulta más apropiado en contextos de alta acidez y capacidad tampón, como los observados en algunas zonas de los suelos de la EEA Baños del Inca.



Nota:

La estimación del requerimiento de cal agrícola por el método integrado del pH y materia orgánica se aplica cuando los suelos presentan $pH < 6.0$. El método es más eficiente en condiciones de $MO > 4.0\%$, y en suelos con bajos porcentajes de materia es probable la sobredosis de cal, lo que podría generar desbalances nutricionales de micronutrientes, por lo que es necesario complementar con estimaciones derivadas de la acidez potencial del suelo.

Mediante este procedimiento se ha estimado que para la zona 1 el requerimiento de cal agrícola es de $0.24\ t\ ha^{-1}$, considerando la mediana de la MO (2.94 %) debido a su baja predictibilidad espacial ($R^2 = 0.25$). De esta manera, la aplicación de cal agrícola permitirá incrementar el pH del suelo, la fertilidad potencial en función a un aumento de las cargas variables del suelo y los contenidos de Ca^{2+} intercambiable. Además, permitirá superar la reactividad de los precipitados de fosfatos de Fe y Al, y los efectos tóxicos del aluminio e hidrógeno en el crecimiento radicular y la absorción de potasio. Asimismo, se evita un sobre encalado en zonas donde se requieren menores dosis, para evitar la adsorción y reducción de disponibilidad de boro.





Agitador digital de matraces
LABSAF

INIA
Centro Nacional de Insumos Agrarios

LABSAF
EQ-065-01
Agitador Magnetico
00657
2022
04220240 0067
AGITADOR MAGNETICO

5. Referencias bibliográficas

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., y Ansari, R. (1999). Impact of soil pH on nutrient uptake by crop plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 51-60). Marcel Dekker, Inc.
- Álvarez-Herrera, J. G., Ruiz-Berrío, H. D., y Acosta-Tova, D. F. (2021). Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 127-140. <https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/5396>
- Atkins, P. W., De Paula, J., y Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University Press.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley y Sons.
- Bear, F. E., Prince, A. L., y Malcolm, J. L. (1945). *Potassium needs of New Jersey soils*. New Jersey Agricultural Experiment Station.
- Bertol, I., Guadagnin, J. C., Cassol, P. C., Amaral, A. J., y Barbosa, F. T. (2004). Phosphorus and potassium losses by water erosion in an inceptisol under natural rainfall. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 485-494. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300010>
- 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>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Buresh, R. J., Smithson, P. C., y Hellums, D. T. (1997). Building Soil Phosphorus Capital in Africa. En R. J. Buresh, P. A. Sanchez, y F. Calhoun (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa* (pp. 111-149). Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub51.c6>
- Chaganti, V., y Culman, S. (2017). Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crop, Forage y Turfgrass Management*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.10.0072>
- Chinea-Horta, A., y Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Ingeniería Agrícola*, 11(1). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269368001/html/>.
- Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C. D. y Spargo, J. (2021). Base cation saturation ratios vs. sufficiency level of nutrients: A false dichotomy in practice. *Agronomy Journal*, 113(6), 5623-5634. <https://doi.org/10.1002/agj2.20787>
- 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>
- 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>
- Feeney, C. J., Robinson, D. A., Thomas, A. R. C., Borrelli, P., Cooper, D. M., y May, L. (2023). *Agricultural practices drive elevated rates of topsoil decline across Kenya, but terracing and reduced tillage can reverse this*. *Science of the Total Environment*, 870, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161925>
- 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://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss58-014>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1996). *Mapa de suelos del Perú*.
- Labrador, J. (2008). *Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica* (Manual técnico). Sociedad Española de Agricultura Ecológica. <https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/01/manual-suelos-jlabrador.pdf>
- Kopittke, P. M., y Menzies, N. W. (2007). A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 259-265. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- Marino, M. A., y Echeverría, H. E. (2018). Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31, 7-18. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/Art-2.pdf>
- McLean, E. O. (1977). Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*, 29, 39-54. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub29.c3>

- Mora-Rodríguez, W. E., y Sernaque-Guarniz, L. M. (2019) *Estudio integral del proceso de degradación de las tierras por erosión hídrica en la comunidad campesina San Felipe, distrito de San Felipe, provincia de Jaén, región de Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/4929>
- Moral-García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(1), 78-86. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Niebla-Torres, R. E., Barrezueta-Unda, S., Luna-Romero, Á., y Chabla-Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195. <https://doi.org/10.62452/zx01j782>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2), 9-13. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Pierre, W. H., y Banwart, W. L. (1973). Excess-Base and Excess-Base/Nitrogen ratio of various crop species and parts of Plants. *Agronomy Journal*, 65(1), 91-96. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010028x>
- Quispe, K., Mejía, S., Carbajal, C., Alejandro, L., Verástegui, P., y Solórzano, R. (2024). Spatial variability of soil acidity and lime requirements for potato cultivation in the Huánuco highlands. *Agriculture*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/agriculture14122286>
- Quispe-Matos, K. R., Carbajal-Llosa, C. M., Mejía-Maita, S. Y., Llerena-Arroyo, R. A., Solórzano-Acosta, R. A., y Cruz-Luis, J. A. (2025). *Variación espacial de la fertilidad del suelo en la EEA Canaán*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <http://hdl.handle.net/20.500.12955/2852>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Teixeira, W. G., Alvarez, V. H., Neves, J. C. L., y Paulucio, R. B. (2020). Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200078>
- Wang, C., y Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., y Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>
- Zhang, G. Q. (1999). *Effects of exchangeable soil calcium, magnesium and calcium/magnesium ratios on plant nutrition and growth of lettuce on an ultisol* [Tesis de de Magister Scientiae, University of Hawai'i at Manoa]. Repositorio Institucional de la Universidad de Hawai'i en Manoa. <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/items/8a99ab1e-dcd5-4822-9889-c99836d9526a>

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



Ver nuestro alcance de acreditación



Ver nuestros servicios



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



Instituto Nacional de Innovación Agraria







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

ISBN: 978-9972-44-242-1



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru