

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



VARIABILIDAD ESPACIAL DE pH EN TRES SISTEMAS DE USO DEL SUELO EN
EL DISTRITO DE RUPA RUPA, REGIÓN HUANUCO

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERA EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

KELLY NOEMI VENTURA JORGE

Tingo María – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 091-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 05 de junio de 2025, a horas 4:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“VARIABILIDAD ESPACIAL DE pH EN TRES SISTEMAS DE USO DEL SUELO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, REGIÓN HUANUCO”

Presentado por la Bachiller: **VENTURA JORGE, KELLY NOEMI** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 21 de agosto de 2025


Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
PRESIDENTE


Ing. MSc. ERLE O. BUSTAMANTE SCAGLIONI
MIEMBRO


Dr. SANDRO JUNIOR RUIZ CASTRE
MIEMBRO


Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
ASESOR





"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 308 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
VARIABILIDAD ESPACIAL DE pH EN TRES SISTEMAS DE USO DEL SUELO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, REGIÓN HUANUCO	KELLY NOEMI VENTURA JORGE	13 % Trece	Menor a 20 %

Tingo María, 22 de setiembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



VARIABILIDAD ESPACIAL DE pH EN TRES SISTEMAS DE USO DEL
SUELO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, REGIÓN HUANUCO

Autor	: Kelly Noemi Ventura Jorge
Asesor	: Dr. Lucio Manrique de Lara Suarez
Área de investigación	: Ciencias Básicas
Grupo de investigación	: Ciencias Básicas
Línea de investigación:	: Física y química de suelos
Lugar de ejecución	: Predio “Carlos Maby”
Duración	: 06 meses
Financiamiento	: S/. 2 889,7
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María – Perú, 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar a este momento importante de mi formación profesional.

Para mi madre Yolanda Jorge Santamaria y mi padre Heber Ventura Alania, cuyo amor y apoyo incondicional me han dado la fuerza para llegar hasta aquí; a mi tía Carmen Cuchilla Ayra y a mi tío Oscar Obregon Trujillo por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y gracias por creer en mí.

A mi compañero de vida Genis Hirlen Gomez Ferrer por su apoyo y soporte incondicional y a mi hija Hannah Nathalith Gomez Ventura, gracias por ser mi inspiración y mi motivación para luchar frente a los obstáculos de la vida.

Para mis hermanos: Eloisa, Yoel, Yhomar, Hilmar; a mi prima Wendy y a mis sobrinas: Ammy y Guadalupe. Gracias a ellos aprendí que nunca estaré sola.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a los docentes de la escuela profesional de Conservación de Suelos y Agua, que me formaron para ser una buena profesional.

A los jurados de mi tesis: presidente Dr. Wilfredo Alva Valdiviezo, a los miembros Ing. MSc. Erle Otto Javier Bustamante Scaglioni, Dr. Sandro Junior Ruiz Castre, por la revisión y redacción de la tesis de investigación.

Al técnico de laboratorio el ing. Gilmer Milton Neira Trujillo que me ayudó en los análisis del pH en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

A mi asesor el Dr. Lucio Manrique De Lara Suarez por el asesoramiento y a la vez concederme realizar la ejecución de mi trabajo de investigación en su finca “Carlos Maby”.

Agradecerles a todos mis colegas los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos, cómplices y hermanos. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas..

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo	3
2.1.1.1. Aplicaciones de la variabilidad espacial	4
2.1.2. Distribución espacial	6
2.1.2.1. Variabilidad espacial de los suelos.....	6
2.1.3. Metodología de interpolación.....	7
2.1.3.1. Kriging	7
2.1.4. Análisis y representación de la dependencia espacial	8
2.1.4.1. Nugget (Co).....	8
2.1.4.2. Meseta o sill (Co + C)	9
2.1.4.3. Variabilidad estructural (C).....	9
2.1.4.4. Rango	9
2.1.5. Inverse Distance Weighting - IDW	10
2.1.5.1. Componentes del modelo IDW	11
2.1.6. Análisis geoestadísticos.....	12
2.1.6.1. Histograma	12
2.1.6.2. Normal QQPlot	12
2.1.6.3. Mapa voronoi	12
2.1.6.4. Análisis de tendencia.....	13
2.1.6.5. Semivariograma/nube de covarianza	13
2.1.7. Modelo de validación cruzada	13
2.1.7.1. Media de los errores (ME)	13
2.1.7.2. Media estandarizada de los errores (MEQ).....	14
2.1.7.3. Error estandarizado medio (MSE).....	14
2.1.7.4. Error cuadrático medio (RMSE)	14
2.1.7.5. Error cuadrático medio estandarizado (RMSSE).....	14

2.1.8. El pH en el suelo	14
2.1.8.1. La importancia del pH del suelo	17
2.1.9. Sistemas de uso del suelo	19
2.1.9.1. Suelo de pastizal.....	20
2.1.9.2. Suelo naranjal.....	20
2.1.9.3. Suelo de bosque.....	20
2.2. Estado de arte.....	21
2.2.1. Internacional	21
2.2.2. Nacional.....	22
2.2.3. Local.....	23
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1. Lugar de ejecución.....	25
3.1.1. Ubicación política.....	25
3.1.2. Ubicación geográfica	25
3.1.3. Propiedades generales.....	25
3.1.3.1. Climatología.....	25
3.1.3.2. Suelos	26
3.1.3.3. Accesibilidad.....	26
3.2. Material y equipos	26
3.3. Criterios de investigación	26
3.3.1. Nivel de investigación	26
3.3.2. Tipo de investigación.....	27
3.3.3. Variables de estudio.....	27
3.3.4. Diseño de investigación.....	27
3.3.5. Población	27
3.3.6. Muestra	27
3.3.7. Técnicas de investigación	28
3.3.8. Instrumentos de investigación	28
3.3.9. Análisis estadístico	28
3.4. Metodología.....	28
3.4.1. Descripción del contenido de pH en tres sistemas de uso del suelo.....	28
3.4.2. Determinación del semivariograma del pH en tres sistemas de uso del suelo ...	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Descripción del contenido de pH en tres sistemas de uso del suelo	35

4.2. Determinación del semivariograma del pH en tres sistemas de uso de los suelos	36
V. CONCLUSIONES.....	53
VI. PROPUESTAS A FUTURO	54
VII. REFERENCIAS.....	55
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Páginas
1. Escala de interpretación del pH	17
2. Localización geográfica de los predios de estudio	25
3. Estadística descriptiva del pH en las parcelas evaluadas	35
4. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio naranjal inicial.....	40
5. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio naranjal final	40
6. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio pastizal inicial	40
7. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio pastizal final	41
8. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio bosque inicial	41
9. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio bosque final	41
10. Análisis exploratorio de datos en la primera evaluación (Diciembre)	42
11. Análisis exploratorio de datos en la segunda evaluación (Setiembre)	42
12. Propiedades del semivariograma empleando Kriging del pH en los sistemas de uso del suelo en la primera medición	43
13. Propiedades del semivariograma empleando Kriging del pH en los sistemas de uso del suelo en la segunda medición.....	43
14. Propiedades del semivariograma empleando IDW del pH en los sistemas de uso del suelo de la primera medición	45
15. Propiedades del semivariograma empleando IDW del pH en los sistemas de uso del suelo de la segunda medición.....	45
16. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging en la primera medición	46
17. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging en la segunda medición	46
18. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación IDW en la primera medición	48
19. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación IDW en la segunda medición	48
20. Prueba de T de Student para muestras emparejadas para el pH	49
21. Rangos de interpretación del pH en diferentes sistemas de uso del suelo en la interpolación kriging e IDW	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Componentes del semivariograma.....	10
2. Predio naranjal con sus respectivas muestras de suelo.....	29
3. Predio pastizal con sus respectivas muestras de suelo	29
4. Predio de bosque con sus respectivas muestras de suelo.....	30
5. Histogramas de los sistemas de uso del suelo al inicio y final.....	37
6. Prueba de normalidad de los sistemas de uso del suelo al inicio y final.....	38
7. Mapa voronoi de los sistemas de uso del suelo al inicio y final.....	39
8. Semivariograma del pH inicial de la parcela naranjal.....	68
9. Semivariograma del pH final de la parcela naranjal.....	68
10. Semivariograma del pH inicial de la parcela pastizal.....	69
11. Semivariograma del pH final de la parcela pastizal	69
12. Semivariograma del pH inicial de la parcela bosque	70
13. Semivariograma del pH final de la parcela bosque	70
14. Delimitación y demarcación de las parcelas y muestras de estudio	82
15. Extracción y geoposicionamiento de las muestras de estudio	82
16. Extracción y separación de las muestras de estudio	83
17. Secado de las muestras extraídas de los tres sistemas de uso de suelos.....	83
18. Colección y rotulado de las muestras de suelos de estudio	84
19. Tamizado de las muestras de estudio	84
20. Pesaje de las muestras para el análisis del pH.....	85
21. Medición del pH en los suelos de estudio con el peachímetro digital.....	85

RESUMEN

La variabilidad espacial de pH es la diferencia en los niveles de la acidez o alcalinidad de un área geográfica, siendo un problema por los cambios de usos del suelo ocasionando la perturbación de los suelos, es por ello, que se determinó la variabilidad espacial del pH en tres sistemas de uso del suelo en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa. Asimismo, se extrajeron muestras de suelos de cultivos de cítricos, pastos y de bosque donde se evaluaron el pH de los suelos en un área de 10 000 m² para cada parcela. Se encontró un pH 5,76 a 7,17 en las tres parcelas evaluadas, asimismo, un análisis exploratorio de datos cuya transformación fue logarítmica y ninguna, tipo kriging ordinario, modelo estable, cuyo nugget, sill y grado de dependencia espacial tuvieron poco error, una eficiencia de predicción de 42,88 a 75,09 % en la interpolación de kriging ordinario, mientras que para la interpolación del IDW tuvo poco error pero con una deficiente predicción de 3,75-53,21 % cuyo poder fue de dos con tipo de vecindario estándar y ocho tipos de sectores en las parcelas estudiadas en la temporada primavera-invierno. Se concluyó que existió un suelo fuertemente ácido a ligeramente alcalino y existió una mayor área de acidez en el suelo de cultivo de naranjal y una mayor área de alcalinidad en el suelo de bosque del predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa – Huánuco.

Palabras clave: *semivariograma, acidez y suelos agrícolas.*

ABSTRACT

The spatial variability of the pH is the difference between the levels of acidity and the alkalinity of a geographical area, which becomes a problem due to the changes in soil use, causing the perturbation of the soil; due to this, the spatial variability of the pH for three systems of soil use was determined on the “Carlos Maby” property in the Rupa Rupa district [of Peru]. At the same time, soil samples were extracted from the citric crops, grasses and forest, where the pH of the soils was evaluated in a 10,000 m² area for each plot. A pH from 5.76 to 7.17 was found for the three plots that were evaluated, as well as an exploratory analysis of the data, the transformation of which was logarithmic and none, ordinary kriging type, stable model, the nugget, sill and degree of spatial dependency of which had little error, a prediction efficiency from 42.88 to 75.09% in the interpolation of the ordinary kriging, meanwhile, for the interpolation of the IDW there was little error, but a prediction deficiency of 3.75 – 53.21%, the power of which was two with a standard type of neighborhood and eight types of sectors for the plots in study during the Spring – Winter season. It was concluded that a strongly acidic to slightly alkaline soil existed and a greater area of acidity existed in the soil from the orange crop and a greater area of alkalinity in the forest from the “Carlos Maby” property in the Rupa Rupa district of Huánuco.

Keywords: *semivariogram, acidity, agricultural soil*

I. INTRODUCCIÓN

Los cambios de uso de suelo del Huallaga vienen ocurriendo de manera desmedida debido a la necesidad que los pobladores para solventar su alimentación y mejorar su economía familiar, resultado de ellos se les despoja o merma a la cobertura que presentan los suelos en condiciones naturales para establecer otros cultivos o pastos que con el paso del tiempo empiezan a modificar las características de los suelos y se realizan de una manera desigual en un mismo terreno.

Las variaciones de las características fisicoquímicas del suelo es una característica propia de los mismos, pero con la intervención de las personas sobre el uso que se le asigna de acuerdo a su necesidad de instalar cultivos o criar animales, modificarán algunas propiedades y por el cual deben ser tratados cada área de acuerdo con sus propias características, ante ello surge la siguiente interrogante: ¿Las técnicas de interpolación representan eficientemente las superficies espaciales del pH en los tres sistemas de uso del suelo en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco?

La presente investigación se justifica por el escaso conocimiento sobre la variabilidad espacial del pH en los suelos naranjales, pastizales y de bosque, es por ello que fue importante de realizar esta investigación ya que existe menor variabilidad de las propiedades del suelo cuando esta se encuentra en su condición natural (medio no intervenido), que cuando estas áreas son sometidas agrícola, siendo afectados por un mal uso que se le otorgue al suelo serán las que presentarán la mayor variabilidad; conociendo dichos resultados, se les podrá tratar a cada medio de acuerdo a las características que presentan o también se generará información básica con fines de que se realicen más estudios considerando otras propiedades del suelo para determinar relación, causalidad o predicción con fines de avanzar hacia estudios aplicados que poseen propósitos de mejorar la calidad de los suelos que presentan.

La hipótesis planteada en el proyecto de tesis radica en que “La interpolación del kriging ordinario es la que tuvo mejor eficiencia de predicción en las superficies espaciales en los tres sistemas de uso del suelo en el distrito de Rupa Rupa, región Huánuco”, asimismo, se plantean los objetivos siguientes:

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Analizar la variabilidad espacial del pH en tres sistemas de uso del suelo en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa, región Huánuco.

1.1.2. Objetivos específicos

- Describir el contenido de pH en tres sistemas de uso del suelo.
- Determinar el semivariograma del pH en tres sistemas de uso del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo

La heterogeneidad espacial de las características químicas del suelo representa un desafío para los científicos dedicados a la agricultura de precisión, especialmente cuando se busca determinar la distribución de la concentración de nutrientes u otras variables químicas relevantes para la investigación (Cristobal et al., 2018).

Mulla y McBratney (2000) Indican que las diferencias en las características del suelo pueden originarse por factores regionales como el clima, la topografía y el material parental; no obstante, hay abundantes pruebas de que variaciones significativas ocurren no solo entre distintas regiones, sino también en áreas relativamente pequeñas.

Aunque cuenta con parcelas de menor tamaño (1.6 ha), presenta una variabilidad superior en comparación con parcelas grandes, lo cual se confirma mediante el valor del rango obtenido en el análisis espacial, que a su vez se ha asociado con el cambio de cultivo en una parcela (Havlin et al., 1999).

Lo alarmante es que dentro de estas secciones del terreno se presente una variabilidad considerable en las características del área de estudio, lo que impediría realizar un diagnóstico preciso. Dado que el suelo es un sistema dinámico, existe cierta heterogeneidad en él, por lo que es necesario evaluar si dicha variación es lo suficientemente relevante; en caso afirmativo, se podría concluir que, dentro de estas zonas, aparentemente homogéneas, existen condiciones que requieren un manejo diferenciado (Rodríguez y Rodríguez, 2002).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Wilding (Wilding, 1985), el coeficiente de variación para valores entre el 2 % y el 15 % sitúa a las parcelas, en función de la variable pH, dentro de la categoría de baja variabilidad; este resultado coincide con los hallazgos de otros estudios previos (Hernández et al., 2003). Sauer y Meek (2003) indican que el efecto del nugget, puede atribuirse a variaciones del área si es pequeña durante el muestreo.

2.1.1.1. Aplicaciones de la variabilidad espacial

Mulla y McBratney (2000) Se identifican dos tipos de variaciones en las propiedades del suelo: 1) aquella causada por errores en el mapeo y la clasificación durante la elaboración de mapas de unidades de suelo, y 2) la variabilidad presente dentro de una misma unidad de suelo, originada por las actividades de manejo realizadas por el ser humano. Para analizar esta segunda forma de variación, es posible utilizar técnicas geoestadísticas que permiten estudiar cómo se comportan las variables del suelo a lo largo del espacio.

Kaluzny et al., (1998) Los datos estadísticos evidencian una variabilidad a escala reducida que puede ser representada mediante la autocorrelación espacial y utilizada en procesos de estimación. Esta variación espacial se puede caracterizar utilizando un correlograma o un variograma., los cuales consideran una serie de valores $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ localizados en x_1, x_2, \dots, x_n , definidos en 1, 2 o 3 dimensiones (Mulla y McBratney, 2000). Por su parte, Fortín et al., (2001) consideran que, para una variable con autocorrelación, es posible estimar su valor en un punto específico del espacio utilizando los valores conocidos de esa variable en otros puntos cercanos. Mulla y McBratney (2000) señalan que la dependencia espacial, representada mediante el semivariograma, se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} * \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_i - Z_{i+h}]^2 \quad (1)$$

Donde:

“ $\gamma(h)$ ”, es el valor de semivarianza obtenido entre pares de valores;

“ h ”, es la distancia de separación entre los puntos x_i y x_{i+h} ,

“ z_i y z_{i+h} ” son los valores medidos para la variable regionalizada en los puntos x_i o x_{i+h} y

“ $n(h)$ ” es el número de pares en cualquier distancia de separación h

Se detectó un alto coeficiente de variación en el potasio (K), lo que indica una mayor heterogeneidad en el comportamiento de esta variable. Por esta razón, es necesario dividir el área en aproximadamente ocho zonas parciales para identificar regiones homogéneas en cuanto a sus patrones de variabilidad. Antes de establecer un experimento, es fundamental conocer tanto la magnitud como la dirección de la variabilidad, ya que esto permite

seleccionar el diseño experimental más adecuado, con el objetivo de minimizar la variación y así poder evaluar de manera estadística el efecto real de los tratamientos (Cristobal et al., 2018).

Cristobal et al., (2018) señala que el pH mostró la menor variabilidad (3.7 %), seguido por el nitrógeno (N) con 24.3 % y la materia orgánica (M.O.) con 25.5 %. En contraste, los mayores niveles de variabilidad se observaron en el fósforo extraíble por Olsen (P-Olsen) con 53.6 % y en el potasio (K) con 70 %. Se sabe que el pH es una propiedad química del suelo que varía poco, ya que está relacionada con la génesis del suelo, y diversos estudios han reportado coeficientes de variación entre 2 y 15 % (Jiyan y Webster, 1984; Jury et al., 1991; Shi et al., 2002; Cox et al., 2006). Por otro lado, se espera una mayor variabilidad en N, M.O., P y K, debido a que estas variables dependen en gran medida de las prácticas de manejo del suelo.

Para corregir la acidez del suelo, se emplea roca caliza molida fina (< 0.25 micras) (Álvarez et al., 2009), que libera grupos OH^- en el suelo. Estos grupos reaccionan con el aluminio y el hidrógeno presentes en solución, neutralizándolos y aumentando el pH. Además, el calcio liberado desplaza estos elementos de los sitios de intercambio, lo que contribuye a liberar y aportar nutrientes retenidos en el suelo (Basak y Biswas, 2016).

Meza (2019) Se indica que, al aplicar el método geoestadístico kriging (KO) para modelar la distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos del suelo, los modelos que mejor se ajustaron fueron: para el pH, un modelo gaussiano ($R^2 = 0.465$); para la conductividad eléctrica (C.E), un modelo esférico ($R^2 = 0.206$); para la arena, un modelo exponencial ($R^2 = 0.226$); para el limo, un modelo circular ($R^2 = 0.108$); y para la arcilla, un modelo exponencial ($R^2 = 0.259$). Estas comparaciones se realizaron entre diferentes tipos de semivariogramas (circular, esférico, gaussiano y exponencial). Además, los rangos de los semivariogramas que mejor se ajustaron superaron ampliamente la distancia promedio entre muestras (3,000 m), con valores de 56,784 m para pH (gaussiano), 42,126 m para C.E (esférico), 5,331 m para arena (exponencial), 5,767 m para limo (circular) y 26,819 m para arcilla (exponencial). Estos rangos garantizan que los mapas de interpolación para cada parámetro fisicoquímico sean espacialmente coherentes. Posteriormente, los modelos para pH ($R^2 = 0.547$) y C.E ($R^2 = 0.268$) fueron mejorados mediante el método de regresión kriging (RK), superando

incluso al método GWRK para pH ($R^2 = 0.467$) y C.E ($R^2 = 0.249$). En función de estos resultados, se concluye que el método RK es superior a los demás.

2.1.2. Distribución espacial

La distribución espacial refleja la variabilidad en el espacio, ya que facilita la estimación indirecta de áreas no muestreadas y de recursos o individuos que no es posible evaluar a pequeña escala, como las características del agua, el suelo, entre otros (Jaramillo et al., 2012).

2.1.2.1. Variabilidad espacial de los suelos

La variabilidad de los diferentes indicadores del suelo es una característica intrínseca, influenciada por factores naturales relacionados con el proceso de formación del suelo, tales como el material parental, el clima, el relieve, los organismos y el tiempo (Jaramillo et al., 2012). Además, esta variabilidad también está condicionada por factores derivados del uso y manejo del suelo, así como por las distintas tecnologías empleadas en la labranza (Déleg, 2018).

La relación existente entre la variabilidad del suelo en diferentes puntos del paisaje se debe a diversos orígenes, vinculados a características significativas del proceso de formación como la litología, el clima, la topografía, la actividad biológica y la intervención humana (Jaramillo et al., 2012; Déleg, 2018). Estos procesos generan una variación espacial que abarca desde pequeñas escalas, reflejando heterogeneidad en mediciones mínimas, hasta escalas mayores que explican la dependencia espacial (Ulloa, 2002; Jaramillo et al., 2012). Sin embargo, la intensidad de estos cambios no es uniforme para todos los indicadores de calidad del suelo, ya que las propiedades químicas tienden a mostrar una mayor variabilidad en comparación con las propiedades físicas, especialmente en suelos sometidos a actividades agrícolas (Jaramillo et al., 2012).

El análisis geoestadístico resulta fundamental para determinar cómo se distribuyen espacialmente las variables estudiadas, constituyendo una herramienta clave en la descripción de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. La localización de los puntos de muestreo permite interpretar los resultados y representarlos gráficamente en función de su distribución espacial dentro de un área determinada (Vendrusculo, 2001). Este proceso depende de múltiples factores, por lo que, según Jaramillo et al. (2012), su análisis

requiere un conocimiento detallado y a gran escala de las características y factores que influyen en dicha variabilidad.

2.1.3. Metodología de interpolación

Las estimaciones en puntos no muestreados se realizan a partir de datos experimentales o reales obtenidos de una población de muestras (Olaya, 2014). Existen diversos métodos de interpolación, aunque algunos son preferidos en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) debido a su compatibilidad y adaptación al tipo de datos analizados. Un ejemplo común en SIG es la creación de capas ráster bidimensionales. Los SIG emplean múltiples herramientas para optimizar la recopilación, recuperación, análisis y toma de decisiones en estudios sobre la variabilidad espaciotemporal de datos, permitiendo generar proyecciones aproximadas que se representan en mapas digitales (Garbanzo-León et al., 2017). Por ello, a partir de una muestra y una observación específica, es posible realizar interpolaciones que estiman valores en ubicaciones sin muestrear (Déleg, 2018), calculando estos valores en función de los datos conocidos en su entorno cercano (Blanco, 2015; Déleg, 2018).

2.1.3.1. Kriging

El método de interpolación más utilizado es el Kriging, nombrado así en honor a su creador, el ingeniero D.G. Krige (Villatoro et al., 2008). Actualmente, el Kriging geoestadístico ofrece predicciones para diversos temas y cuenta con variantes que permiten representar resultados en regiones de respuesta y mapas de probabilidad. La exactitud de este método depende de ciertas propiedades, ya que los métodos de inferencia espacial emplean datos de muestras para estimar valores en puntos no muestreados. Kriging proporciona el mejor estimador lineal insesgado con la menor varianza posible (Porrás, 2016).

La geoestadística se encarga de realizar interpolaciones espaciales para predecir valores en ubicaciones sin muestrear, y el interpolador Kriging es especialmente adecuado para obtener estimaciones lineales verificables mediante el cálculo del error conocido como varianza de Kriging. Este error estimado se ve afectado por el modelo de semivariograma ajustado y la ubicación de los datos muestreados. Los métodos Kriging se fundamentan en analizar el comportamiento espacial de una variable mediante la medición de la covarianza entre los puntos muestreados y aquellos cuyos valores se predicen (Balzarini, 2014). Este enfoque elimina muestras redundantes y ajusta la ponderación de aquellas que se

encuentran muy próximas entre sí o en direcciones opuestas al punto interpolado (Parra y Benítez, 2021).

Olaya (2014) menciona que estas técnicas son eficaces para estudiar cambios temporales y cartografiar con exactitud las variaciones espaciotemporales en la corteza terrestre, donde minimizar el error de predicción es crucial. Las muestras cercanas al punto de interpolación suelen tener mayor peso que las distantes, y si existen puntos en una misma dirección, su influencia se reduce para evitar sesgos.

2.1.4. Análisis y representación de la dependencia espacial

Reconociendo el nivel de correlación entre los datos, se destaca la relevancia de identificar el grado de dependencia espacial. Este se calcula dividiendo el efecto pepita entre el estado estacionario y expresando el resultado en porcentaje. Cuando el valor es menor al 27 % (o 25 % según la fuente), la dependencia espacial se considera alta; si se encuentra entre el 26 % y el 75 %, es media; y si supera el 76 %, la dependencia espacial es baja (Cambardella et al., 1994).

La geoestadística se encarga de analizar la dependencia espacial de los indicadores relacionados con la calidad del suelo, utilizando principalmente el semivariograma como herramienta fundamental. Para que este análisis sea válido, deben cumplirse dos condiciones: a) que los datos sigan una distribución normal, y b) que sean estacionarios o tengan una distribución simétrica (Jaramillo et al., 2012). Por ello, los datos deben presentar al menos una distribución simétrica o normal, además de mantener una varianza y media constantes en todos los grupos de distancia establecidos (Jaramillo et al., 2012). Diversos autores como Villatoro et al. (2008), Jaramillo et al. (2012), Déleg (2018), y China y Rodríguez (2021) describen los componentes que conforman el semivariograma:

2.1.4.1. Nugget (Co)

El nugget (Co) es la varianza no explicada por el modelo, y se calcula como la intercepción con el eje Y. Se conoce también como varianza error puesto que la varianza de dos puntos separados por 0 metros debería ser 0. Por esta razón, esta varianza suele reflejar la variabilidad a una escala menor que la del muestreo realizado (López-Bonilla et al., 2011).

Se trata de la semivarianza, que no depende de la distancia entre las muestras. Cuando su valor es muy elevado, indica que la propiedad analizada está influenciada principalmente por procesos que actúan a corto alcance. Existen variables cuya variabilidad es completamente aleatoria, conocida como nugget o pepita pura; en estos casos, el modelo ajustado corresponde a una línea horizontal, donde el sill coincide con el valor del nugget para todas las distancias (Webster y Oliver, 2007).

2.1.4.2. Meseta o sill ($C_0 + C$)

La semivarianza máxima observada entre pares de puntos se denomina sill y debe coincidir con la varianza total de la población. La proporción $C / (C + C_0)$ representa el grado de variación espacial, lo que a su vez indica el nivel de incertidumbre al interpolar valores en el espacio (López-Bonilla et al., 2011).

El sill corresponde al valor más alto que alcanza la semivarianza y equivale a la suma del nugget y la variabilidad estructural. Cuando se cumple el supuesto de estacionariedad, el sill es muy parecido a la varianza calculada a partir de los datos experimentales. Este valor se mantiene constante a partir de una cierta distancia, conocida como rango, a partir de la cual las muestras dejan de estar espacialmente relacionadas. Si el sill no se estabiliza, es decir, si no se alcanza un valor constante en ninguna de las distancias muestreadas, se concluye que no se ha podido caracterizar adecuadamente la variabilidad espacial en la zona, y el modelo más sencillo que se ajusta a los datos es uno lineal (Webster y Oliver, 2007).

2.1.4.3. Variabilidad estructural (C)

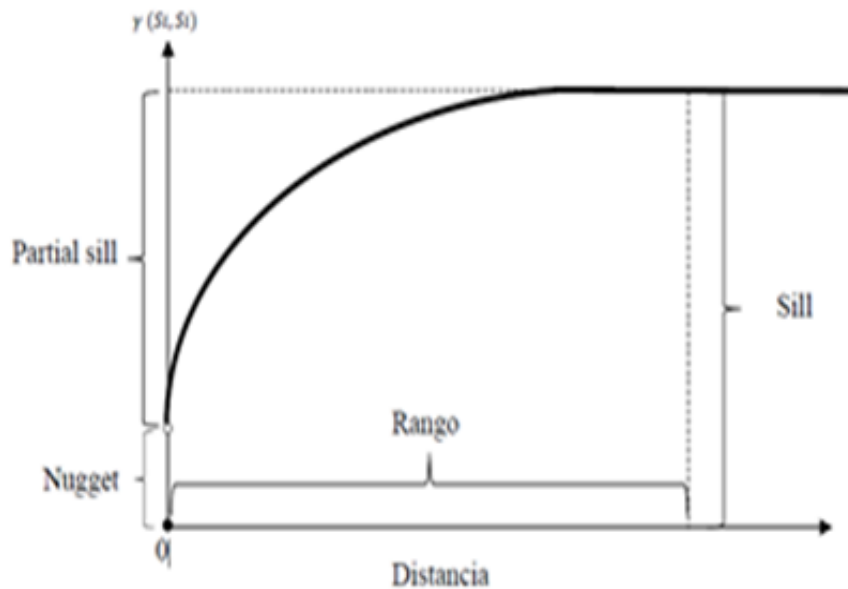
La variabilidad espacial de la variable se define como la diferencia entre el sill y el nugget (Webster y Oliver, 2007).

2.1.4.4. Rango

El rango (A_0) es la distancia a la que la semivarianza deja de incrementarse y marca el límite a partir del cual las muestras son independientes espacialmente entre sí (López-Bonilla et al., 2011).

En otras palabras, el rango es la distancia en la que la semivarianza se estabiliza, alcanzando el sill. Este parámetro indica hasta qué distancia existe dependencia espacial entre las muestras; aquellas ubicadas a menos distancia que el rango están

espacialmente correlacionadas, mientras que las que se encuentran a una distancia mayor son consideradas independientes (Webster y Oliver, 2007).



Fuente: Johnston et al. (2001)

Figura 1. Componentes del semivariograma

2.1.5. Inverse Distance Weighting - IDW

Es un método de interpolación espacial que estima valores en ubicaciones no muestreadas basándose en valores conocidos, asignando a cada dato conocido un peso inversamente proporcional a la distancia desde el punto a estimar. Es decir, los puntos más cercanos al lugar de interés tienen mayor influencia en la estimación que los puntos más alejados (Navarrete y López, 2019). Asimismo, cuyas características principales de la interpolación IDW son los siguientes:

Peso inverso a la distancia: La estimación en un punto se calcula como una media ponderada de los valores de los puntos cercanos, donde el peso es mayor cuanto menor es la distancia.

Asume que la variable espacial cambia suavemente: Por lo tanto, valores cercanos espacialmente tienden a ser similares.

Método determinístico y local: No hace suposiciones estadísticas complejas ni modelo de variabilidad, sino que se basa en la proximidad geométrica de los datos.

Fácil de implementar y entender: Generalmente usado cuando no se dispone de un modelo estadístico profundo como en kriging (Navarrete y López, 2019).

2.1.5.1. Componentes del modelo IDW

A. Puntos muestreados y distancia

El IDW asume que los elementos cercanos son más similares que los lejanos, por lo que los valores medidos más próximos a la ubicación de predicción tienen mayor influencia. La influencia de cada punto muestreado disminuye con la distancia (ESRI, 2025a).

Señala que mientras más próximo se encuentre el punto de muestreo respecto al lugar donde no se ha realizado el muestreo, mayor será el impacto que tendrá en la estimación del valor (Saad, 2024).

B. Parámetro de potencia (p)

El parámetro “p” controla que tan rápidamente disminuye la influencia de un punto de muestreo a medida que aumenta la distancia. Cuando “p” es mayor, los puntos cercanos tienen aún más peso, llevando a una interpolación que se concentra más en las áreas próximas (Saad, 2024).

Este valor determina la velocidad a la que la influencia de un punto muestreado se reduce al aumentar la distancia. Valores de p más altos otorgan mayor peso a los puntos más cercanos, resultando en una interpolación más localizada. Un p igual a 2, conocido como interpolación de distancia inversa cuadrada ponderada, es el valor predeterminado común, aunque su ajuste debe investigarse (ESRI, 2025a).

C. Número de muestras

Es la cantidad de puntos utilizados en la estimación influye en la exactitud de los valores calculados. Incluir más muestras mejora la precisión de la estimación, particularmente en áreas donde existe una gran variabilidad espacial (Saad, 2024). Asimismo, comprende lo siguiente:

Vecinos máximos y mínimos: Se define un número máximo y mínimo de puntos por sector que se utilizarán para el cálculo (ESRI, 2025b).

Tipo de sector: Para asegurar que los vecinos provengan de diferentes direcciones alrededor de la ubicación de predicción, la vecindad de búsqueda puede dividir el espacio en varios sectores. Los vecinos se buscan independientemente en cada sector (ESRI, 2025b).

Aunque no es necesario usar todos los puntos de entrada para una predicción, se seleccionan los puntos cercanos a la ubicación de predicción. La vecindad de búsqueda permite elegir cuántos puntos se usarán, lo que también acelera el cálculo (ESRI, 2025b).

2.1.6. Análisis geoestadísticos

2.1.6.1. Histograma

Es una herramienta gráfica y estadística fundamental para analizar y comprender cómo se distribuyen los valores de una variable espacial antes y después de aplicar el modelo de interpolación. Un histograma muestra cómo se distribuyen los valores de la variable en cuestión sobre el área de estudio. Permite detectar si los datos están sesgados, presentan una distribución normal o tienen valores atípicos (Vargas et al., 2023).

2.1.6.2. Normal QQPlot

Es una herramienta gráfica utilizada en modelos de interpolación espacial para comparar la distribución de los datos observados (originales o interpolados) con una distribución normal teórica. El gráfico muestra en el eje X los cuantiles de una distribución normal estándar, y en el eje Y los cuantiles correspondientes de los datos reales. Si los puntos caen aproximadamente sobre una línea recta, se interpreta que los datos siguen una distribución normal (Lebrenz y Bárdossy, 2019).

2.1.6.3. Mapa voronoi

Es una partición del espacio geográfico en polígonos, donde cada polígono corresponde a un punto de muestra y contiene todas las ubicaciones que están más cercanas a ese punto que a cualquier otro. El espacio se divide según la proximidad a los puntos conocidos, generando regiones de influencia para cada dato puntual. Cada celda de Voronoi

representa el área en la que un punto de muestreo es el vecino más cercano. Esto lo hace útil para asignar valores a zonas cercanas a datos observados (Melodia y Lenz, 2022).

2.1.6.4. Análisis de tendencia

Es el estudio y evaluación de patrones sistemáticos, generalmente lineales o polinómicos, en los datos espaciales que reflejan un cambio gradual o patrón general en la variable de interés a lo largo del espacio (y a veces también en el tiempo). En este análisis se busca identificar si existe una dirección, pendiente o comportamiento creciente/decreciente de la variable que pueda influir en la estimación espacial y que deba ser tomado en cuenta por el modelo de interpolación. El análisis de tendencia detecta cómo varía la media o el comportamiento central de la variable en función de la ubicación geográfica, evitando que dicha variación sea interpretada erróneamente como ruido o variabilidad aleatoria (Ruíz-Álvarez et al., 2018).

2.1.6.5. Semivariograma/nube de covarianza

El semivariograma y la nube de covarianza son herramientas fundamentales en los modelos de interpolación espacial, especialmente en la geoestadística, para describir cómo varía la correlación o la dependencia espacial de una variable a medida que aumenta la distancia entre puntos muestreados. El semivariograma es una función que describe la variabilidad espacial de una variable en función de la distancia que separa los puntos de observación, mide la media de la mitad de las diferencias cuadráticas entre los valores de la variable en pares de puntos separados por una distancia específica (h) y sirve para detectar el nivel de autocorrelación espacial cuyos valores cercanos tienden a ser más similares, y conforme aumenta la distancia entre puntos, la similitud disminuye, mientras que la nube de covarianza es un gráfico que muestra la covarianza (medida de dependencia lineal) entre pares de puntos en función de la distancia que los separa, asimismo, es otro modo de expresar la dependencia espacial, donde mayores valores indican mayor similitud entre ubicaciones próximas (Galindo-Pacheco et al., 2024).

2.1.7. Modelo de validación cruzada

2.1.7.1. Media de los errores (ME)

Es el promedio de errores de la validación cruzada. El valor debe ser lo más próximo a cero posible. El error medio mide el sesgo del modelo, donde un error medio positivo indica una tendencia a predecir valores que son demasiado grandes y un error

medio negativo indica una tendencia a no predecir lo suficiente los valores medidos. La estadística está en las unidades de los valores de datos (ESRI, 2025c).

2.1.7.2. Media estandarizada de los errores (MEQ)

Es la raíz cuadrada de los errores de predicción promedio al cuadrado. Este valor debe ser lo más pequeño posible. La estadística mide la precisión de la predicción y el valor se aproxima a la desviación media de los valores predichos a partir de los valores medidos. El valor está en las unidades de los valores de datos (ESRI, 2025c).

2.1.7.3. Error estandarizado medio (MSE)

Es el promedio de los errores estandarizados (error dividido entre error estándar). El valor debe ser lo más próximo a cero posible. La estadística mide el sesgo del modelo en una escala estandarizada para que sea comparable entre datasets con diferentes valores y unidades (ESRI, 2025c).

2.1.7.4. Error cuadrático medio (RMSE)

Es el promedio cuadrático (cuadrático medio) de los errores estándar. Esta estadística mide la precisión del modelo, una tendencia a producir distribuciones predictivas estrechas muy centradas alrededor del valor predicho. El valor debe ser lo más pequeño posible, pero también aproximadamente igual al error cuadrático medio (ESRI, 2025c).

2.1.7.5. Error cuadrático medio estandarizado (RMSSE)

Es el valor cuadrático medio de los errores estandarizados. Esta estadística mide la precisión de los errores estándar comparando la variabilidad de los errores de validación cruzada con los errores estándar estimados. El valor debe ser lo más próximo a uno posible. Los valores menores que uno indican que los errores estándar estimados son demasiado grandes y los valores mayores que uno indican que son demasiado pequeños. El valor se puede interpretar como una relación inversa; por ejemplo, un valor de tres significa que los errores estándar son un tercio de los valores que deben ser, en promedio (ESRI, 2025c).

2.1.8. El pH en el suelo

El pH del suelo es una propiedad química fundamental, ya que indica el grado de acidez o alcalinidad de la solución del suelo, de la cual las raíces y los

microorganismos obtienen los nutrientes necesarios. Es crucial mejorar las técnicas que aumenten la productividad y reduzcan la contaminación del suelo y del agua (Inegi, 2002), especialmente en zonas de secano. Tanto el tipo de suelo como el clima influyen en la capacidad para cultivar una gran variedad de cultivos. La acidez del suelo es una de las variables más analizadas debido a su estrecha relación con otras características del suelo que afectan el crecimiento de las plantas (Havlin et al., 1999).

Los parámetros que muestran mayor variación son el Ca y el P (46 % ambos), y el pH tiene 4 % de coeficiente de variación. En cuanto a los valores promedio, pH y Ca estuvieron por debajo de 5.5 y 4.0 Cmol(+)/kg, respectivamente, que son sus niveles críticos (Villatoro et al., 2008).

Los modelos más adecuados fueron seleccionados en función de la menor suma residual de los cuadrados, lo que se asocia con una mejor estimación de los semivariogramas. Los rangos obtenidos oscilaron entre 27 y 114 metros, correspondientes al pH y al $\ln(P)$, respectivamente. El rango reducido para el pH (27 m) indica una baja autocorrelación espacial, un comportamiento similar al reportado en otros estudios (Muñoz et al., 2006).

Esto sugiere que el manejo del suelo tiene un fuerte impacto en la variabilidad espacial del pH. En contraste, en otras dos parcelas que han recibido un manejo homogéneo durante los años previos al estudio, se observó que el pH mantiene una dependencia espacial hasta distancias aproximadas de 205 y 150 metros (Zarazúa et al., 2007).

Se detecta una ligera tendencia al aumento del pH en dirección norte-sur. La diferencia entre los valores máximos y mínimos de pH en la parcela de Atequiza es de 0.69, lo que indica un grado razonable de homogeneidad. Además, el análisis de dependencia espacial mostró un rango de 273.49 metros en el semivariograma, lo que permite definir zonas de muestreo con una longitud menor a este valor. Cabe destacar que esta parcela corresponde a un Vertisol pélico, caracterizado por una buena retención de humedad, pero con drenaje deficiente. Esta condición, junto con su alta capacidad de intercambio catiónico, reduce la lixiviación de bases y favorece un pH más uniforme en el terreno (Brady y Weil, 1996).

En las parcelas agrícolas analizadas, el pH del suelo presentó rangos de variación que van desde 55 hasta 273 metros, valores que para un muestreo tradicional se considerarían como unidades homogéneas (Zarazúa et al., 2007). Dado que las parcelas difieren en su historial de manejo, se puede afirmar que este factor influye en la variabilidad espacial del pH (Zarazúa et al., 2007). Por ello, es importante tener en cuenta esta zonificación al planificar y ubicar tratamientos relacionados con el pH. En cuanto a la dirección de los patrones de mayor variación, no se puede definir con claridad, ya que las isolíneas tienden a presentar una forma circular. Respecto a la distribución de la materia orgánica, se identificaron tres zonas con diferentes niveles de variabilidad: la primera, considerada de alta variabilidad, acotada por las coordenadas 0-50 m en la dirección norte-sur y 0-725 m en la dirección este-oeste, con patrones de mayor variación dependientes de la distancia en la dirección norte-sur (Cristobal et al., 2018).

Un suelo con pH neutro presenta la fase de intercambio catiónico saturada con cationes básicos como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , los cuales neutralizan la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación comienza cuando estos cationes se pierden, en parte debido a la actividad de las raíces. Al absorber cationes, las plantas liberan iones H^+ para equilibrar su interior, lo que provoca una disminución del pH en el suelo (Espinosa y Molina, 1999). En suelos inundados y húmedos con un pH inicial menor a 6.5, este valor tiende a aumentar hasta aproximadamente 7.0; mientras que en suelos con pH inicial superior a 6.5, el pH primero disminuye y luego se incrementa hasta cerca de 7.0. Cuando estos suelos se drenan, el pH de los suelos ácidos disminuye, reduciendo su acidez, mientras que en suelos neutros o alcalinos ocurre el efecto contrario (Ding et al., 2019).

El análisis de suelo puede ofrecer datos muy precisos sobre los parámetros fisicoquímicos en los puntos de muestreo, pero su aplicación es limitada debido a la cantidad de muestras necesarias y a la complejidad del proceso (Shi et al., 2019). Por ello, actualmente se combina la estadística multivariada con el análisis geoestadístico para modelar mapas de distribución espacial de estos parámetros a partir de un número reducido de muestras (Li et al., 2017). Esta metodología es fundamental para diseñar estrategias de manejo que mantengan la fertilidad del suelo y prevengan su degradación (Wu et al., 2019).

Tabla 1. Escala de interpretación del pH

Rangos	Interpretación
< 3,5	Ultra ácido
3,6 - 4,4	Extremadamente ácido
4,5 - 5	Muy fuertemente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido
5,6 - 6	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 - 9	Fuertemente alcalino
> 9	Muy fuertemente alcalino

Fuente: MIDAGRI (2022)

2.1.8.1. La importancia del pH del suelo

El pH es una de las variables más relevantes en los suelos agrícolas, ya que influye directamente en la absorción de nutrientes por parte de las plantas y en la ocurrencia de numerosos procesos químicos dentro del suelo. Generalmente, el pH ideal para estos suelos se sitúa entre 6.5 y 7.0, rango en el cual se logran los mejores rendimientos y mayor productividad (Prasad y Power, 1997), dado que en estas condiciones los nutrientes son más fácilmente disponibles para la mayoría de los cultivos. No obstante, existen nutrientes, especialmente microelementos, y ciertos cultivos que prefieren suelos con pH más ácido o alcalino.

Asimismo, las características de estos suelos pueden provocar la precipitación de algunos micronutrientes al reaccionar con el fósforo, lo que reduce su disponibilidad para las plantas (Benton y Nabb, 2003) e incluso, en situaciones extremas, puede afectar la estructura del suelo. El pH del suelo determina la disponibilidad de nutrientes para las plantas, siendo un factor clave que puede ocasionar deficiencias, toxicidades o niveles inadecuados de ciertos elementos (Benton y Nabb, 2003).

A. pH de un suelo pastizal

Los suelos de pastizales suelen presentar un rango de pH que varía entre 5.5 y 8.0, dependiendo de factores como la geología, el clima y las prácticas de manejo. En regiones con alta precipitación, como los pastizales tropicales, es común encontrar suelos más ácidos debido a la lixiviación de bases (Terrel et al., 2020). En áreas áridas y semiáridas, como algunos pastizales de América del Norte, los suelos tienden a ser más alcalinos, a menudo debido a la acumulación de carbonatos de calcio (Castillo-Trejo et al., 2023). El pH del suelo afecta la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana en los pastizales, en suelos ácidos ($\text{pH} < 6.0$) la disponibilidad de fósforo y otros nutrientes puede disminuir, afectando el desarrollo de las plantas, mientras que en suelos alcalinos ($\text{pH} > 7.5$) (Yáñez et al., 2023).

B. pH de un suelo naranjal

El rango de pH óptimo para un suelo de naranjal es generalmente entre 6.0 y 6.5, este rango es crucial para mantener la fertilidad del suelo y garantizar un crecimiento y rendimiento saludables de los cultivos de cítricos. El pH del suelo afecta la disponibilidad de nutrientes, y mantenerlo dentro de este rango ayuda a prevenir problemas como deficiencias de nutrientes y toxicidades, particularmente con elementos como hierro y aluminio (Morgan, 2019).

Los suelos con un pH inferior a 6,0 pueden conducir a la deficiencia de hierro, lo que resulta en clorosis, mientras que los niveles de pH más altos pueden disminuir la disponibilidad de ciertos nutrientes, lo que afecta la salud general de las plantas de cítricos (Zang et al., 2023). Se recomiendan prácticas regulares de prueba y manejo del suelo para mantener los niveles de pH apropiados para una producción óptima de cítricos (Morgan, 2019).

C. pH de un suelo de bosque

El pH de los suelos de bosque puede variar considerablemente dependiendo del tipo de bosque y su ubicación. En general, los suelos de bosque tienden a ser ligeramente ácidos a neutros. En un estudio en un bosque seco en Perú, se encontraron valores de pH que variaban desde el ácido hasta ligeramente neutro, dependiente de las especies de árboles presentes (Sánchez et al., 2021). Por otro lado, en un bosque de pinos en México, un

pH promedio de 7.75 en las capas superficiales, por lo que indica un suelo más alcalino (Yáñez et al., 2023).

2.1.9. Sistemas de uso del suelo

La degradación del suelo se refleja principalmente en la disminución de nutrientes y en cambios en sus propiedades físicas y biológicas (Wit et al., 1995). Para cuantificar esta degradación, es necesario evaluar aquellas características que sirvan como indicadores de las alteraciones provocadas por los sistemas de manejo. Heil y Sposito (1997) señalan la importancia de identificar, dentro de los atributos químicos que reflejan la calidad del suelo como el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los nutrientes cuáles son los más sensibles a las prácticas de manejo.

Los ecosistemas terrestres han experimentado profundas transformaciones, principalmente debido a la conversión de la cobertura del suelo y a la degradación e intensificación de su uso. Estos procesos, comúnmente agrupados bajo los términos de deforestación o degradación forestal, están vinculados a impactos ecológicos significativos en casi todas las escalas (Bocco et al., 2001).

Las causas que impulsan esta degradación son variadas. Algunos investigadores atribuyen los cambios en la cobertura y uso del suelo a la interacción de factores económicos, políticos y ecológicos (Geist y Lambin, 2001). Además, se señala la escasez de estudios cuantitativos que expliquen con precisión las causas y consecuencias de estos factores, ya que las interpretaciones sobre cómo interactúan para promover el cambio difieren considerablemente entre regiones (Kummer y Turner, 1994).

Actualmente, las pendientes pronunciadas no constituyen el principal problema; en las últimas dos décadas se ha registrado una pérdida de suelo por erosión en el 36 % de las áreas con topografía ondulada y colinas suaves con pendientes moderadas. Estas zonas albergan una parte importante de la producción de cereales como maíz y sorgo, así como otros cultivos (Lugo, 2007). Entre las sustancias transportadas por adsorción en sedimentos y semillas se encuentran fosfatos, compuestos orgánicos nitrogenados, insecticidas organoclorados y otros contaminantes (Waliszewski e Infanzón, 2003).

2.1.9.1. Suelo de pastizal

Los pastizales son ecosistemas formados por vegetación nativa o naturalizada que se utilizan para el pastoreo o ramoneo de animales domésticos o silvestres. Su manejo se limita principalmente al control del pastoreo, la quema y la regulación de plantas leñosas. Las estimaciones globales sobre la extensión de los pastizales varían ampliamente, abarcando entre el 18 % y el 80 % de la superficie terrestre, dependiendo de la definición empleada y las fuentes consultadas. Según la Asociación para la Gestión de los Pastizales, la distribución mundial de los principales tipos de vegetación en pastizales es la siguiente: praderas 42 %, matorrales 23 %, bosques 12 %, mientras que otros tipos de vegetación ocupan el 23 % restante de la superficie terrestre (Kihui, 2020).

Los ecosistemas de pastizales, como otros recursos naturales, proporcionan abastecimiento esencial, apoyo, regulación y servicios culturales, de forma tanto directa como indirecta. El principal servicio directo reconocido que brindan los pastizales es su contribución como fuente de alimentos y hábitat para el ganado y la fauna (Kihui, 2020).

2.1.9.2. Suelo naranjal

Son los suelos utilizados para el cultivo de naranjas y otros cítricos, estos suelos son fundamentales para la producción agrícola. Los suelos naranjales suelen ser fértiles y bien drenados. La textura del suelo puede variar, generalmente se busca un equilibrio entre arena, limo y arcilla para facilitar el drenaje y la retención de humedad. El pH ideal para los naranjales se encuentra entre 6.0 y 6.5. Un pH más bajo puede afectar la disponibilidad de nutrientes, mientras que un pH más alto puede provocar deficiencias de micronutrientes como el hierro. Los naranjales requieren una adecuada disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio (Bermúdez-Florez et al., 2018).

2.1.9.3. Suelo de bosque

El suelo del bosque es uno de los principales lugares donde ocurre la descomposición, un proceso crucial para la sostenibilidad del bosque en su conjunto. Además, alberga una gran diversidad de plantas y animales, y proporciona el soporte necesario para los árboles que forman el dosel forestal (Mongabay, 2009). Los bosques desempeñan un papel fundamental en el suministro de agua de calidad para diversos usos, así como en la estabilización y protección del suelo frente a la erosión. Gran parte del agua dulce a nivel mundial proviene de cuencas con cobertura forestal, y los bosques ayudan a preservar embalses

y presas evitando su colmatación por sedimentos. Asimismo, los suelos forestales actúan como filtros naturales que protegen las aguas subterráneas de contaminantes (FAO, 2009). Sin embargo, los bosques enfrentan presiones significativas, que en muchas regiones se intensificarán debido al cambio climático (IUFRO, 2017).

2.2. Estado de arte

2.2.1. Internacional

Medina (2022) estimó la variabilidad y distribución espacial del pH y la materia orgánica en el área agrícola del municipio de Tlajomulco de Zúñiga. La metodología empleada fue el método del potenciómetro para el pH con una proporción de suelo: agua (1:2) y el método Walkley y Black para la materia orgánica según lo dispuesto por la (SEMARNAT, 2002) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 5,34, una D.E. de 0,75, un C.V. de 0,14 %, una asimetría de 0,56 y una curtosis de -0.51, asimismo, un nugget de 0,3406072, sill de 0,5106844, rango de 2834,53 m y un R^2 de 0,8159. El autor concluyó que encontró suelos fuertemente ácidos en los bosques de pino-encino, teniendo un comportamiento descendente en el sentido oeste-este, asimismo, un grado de variación espacial de 33,3 % (pH), por último, encontró una relación del material parental, la fisiografía y la biota con la fertilización y el incremento de la acidez de los suelos.

Bonomo y Rodríguez (2020) cuantificaron y analizaron la variabilidad espacial de la biomasa de forraje y su relación con algunas propiedades físico-químicas del suelo en pasturas de *Festuca arundinacea*. La metodología empleada para el uso, manejo y los parámetros físicoquímicos fue dispuesto por Quincke et al. (2019) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron un modelo exponencial, nugget de 0,69, sill de 2,41, rango de 63,15 m, nugget/sill de 29 %, una dependencia espacial moderada y una validación cruzada de modelo $Y = 0,068 + 0,978X$, asimismo, una media de 5,10, una D.E. de 0,15 y un C.V. de 3 %. Los autores concluyeron que los suelos oscilaron entre fuertemente a moderadamente ácido, también generó un aumento en la variabilidad espacial en las parcelas de pastoreo generando un descenso del carbono en el suelo.

Arciniegas y Gomez (2018) determinaron la variabilidad espacial de las propiedades físicoquímicas en los suelos con diferentes sistemas de manejo. La metodología

empleada fue un muestreo sistemático de 24 puntos en cuadrículas en cultivos semestrales, cítricos y cultivo de guanábana, asimismo, determinaron el pH del suelo en KCl 1N. Los resultados reportados fueron de un C.V. de 5,48 %, 3,92 (pH), 8,75 ppm (P), 1,77 % (M.O), 1.26 (densidad aparente), 1.87 (resistencia a la penetración), asimismo, un modelo de semivariograma de modelo gaussiano, nugget de 0,0675, sill de 0,365, grado de dependencia espacial de 81,5 %, rango de 91,82 m y un R_2 de 0,263. Los autores concluyeron que la variabilidad espacial de las propiedades fisicoquímicas de suelos tiene una relación con la estructura y composición química del suelo, además, una alta heterogeneidad del pH en los cultivos semestrales, cítricos y el cultivo de guanábana.

Hernández et al. (2018) analizaron y describieron el modelo de la variabilidad espacial del pH y del hierro en una zona de bosque y matorral sub-húmedo de la cuenca media del río Tabure. La metodología empleada fueron la extracción de las muestras de suelo a una profundidad de 10 cm para su análisis, para la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:2) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 7,623, mediana de 7,8, varianza 0,4, D.E. de 0,639, asimetría de -1,048, curtosis de 0,291 y un C.V. de 0,083 %, además, un semivariograma de modelo esférico, nugget de 0, rango de 580 m y un sill de 0,6. Los autores concluyeron que la variabilidad espacial del pH en la cuenca del río Tabure ayuda en la conservación de los suelos en las cuencas hidrográficas y encontraron independencia de los valores de las variables evaluadas.

2.2.2. Nacional

Aróstegui (2022) estimaron la distribución espacial del pH, M.O., N, P y K en el área de producción de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera) del centro poblado de Nueva Libertad, distrito de Tocache, provincia de Tocache - San Martín. La metodología empleada fue la extracción de las muestras de suelo a una profundidad de 20 cm para su análisis, para la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:1) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 4,35, varianza 0,11, D.E. de 0,33 y un C.V. de 7,64 %, además, un semivariograma de modelo circular, nugget de 0,02189, rango de 541,4 m y un sill de 0,06845. Los autores concluyeron que existe suelos fuertemente ácidos a extremadamente ácidos, cuyas tendencias fueron lineales, cuadráticas y cúbicas, asimismo, la semivarianza se incrementó en proporción

directa al rango donde el modelo de Kriging Ordinario fue el modelo de mejor ajustado con un error de 0,05%.

Inocencio (2022) evaluó la distribución y variabilidad espacial de indicadores físicoquímicas y calidad del suelo en el fundo “Cárdenas”. La metodología empleada consistió en la extracción de muestras de suelos cada 30 m en tres hileras paralelas de forma sistemática, la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:2,5) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 4,23 y un C.V. de 5,67 % en el bosque muy húmedo - Premontano Tropical (bmh-PT). La autora encontró un suelo de pH fuertemente ácido con suelos de baja a muy baja calidad, cuya distribución espacial fue de 52,24 % para la calidad baja y 47,76 % para la calidad muy baja, reportando una eficiencia de predicción de valores positivos y predicciones más confiables.

Meza (2019) analizó la distribución espacial de los parámetros físico-químicos en el suelo aplicando SIG en Utcubamba. La metodología empleada consistió en la extracción de una muestra de suelo a 20 cm de profundidad, la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:1) y el modelo de predicción mediante el método geoestadístico del Kriging Ordinario. Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 7,29, D.E. de 1,42 y un C.V. de 19,37 %, además, un semivariograma de modelo gaussiano, nugget de 0,946, rango de 56 784 m y un sill de 2,749. El autor concluyó que existió suelos ácidos a moderadamente alcalinos, cuyo modelo empleado fue el gaussiano de R^2 de 0,465 y una precisión de la distribución espacial de error de 1,085 para el pH en un suelo boscoso.

2.2.3. Local

Alejo (2023) evaluó la distribución espacio-temporal de los parámetros de fertilidad de los suelos de Canchán. La metodología empleada consistió en la extracción de 95 muestras de suelo a 20 cm de profundidad, la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:1). Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 7,64, mediana de 7,52, D.E. de 0,55 y un C.V. de 7,20 %. El autor concluyó que el 59 % de los suelos es moderadamente alcalino, 26 % ligeramente alcalino y 15 % suelo neutro, encontrando lugares que necesitan emplearse enmiendas adecuadas para mejorar la fertilidad del suelo en especial para el P y N de los suelos boscosos.

Tello (2023) determinó la distribución espacial de la calidad del suelo en plantaciones de *Coffea arabica* (café) en el fundo “Domínguez” - Pueblo Libre. La metodología empleada consistió en la extracción de 30 muestras de suelo a 20 cm de profundidad, la evaluación del pH en una relación suelo: agua (1:1). Los resultados encontrados para el pH fueron una media de 5,64, mediana de 1,74, asimetría de -0,56, curtosis de 2,51 y un C.V. de 12,70 %, además, un semivariograma de modelo estable, nugget de 0, rango de 56,20 m, sill de 0,01, un grado de dependencia espacial de 0 % y una eficiencia de predicción de 99,84 %. El autor concluyó que el modelo empleado para el pH fue el Kriging Ordinario, cuyo índice de calidad predominante fue alta con 41,92 %, una calidad moderada de 31,78 % y una calidad baja de 14,79 %, y que existió una relación positiva y directa entre el nitrógeno con la materia orgánica, pH y el calcio.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Se realizó en el predio denominado “Carlos Maby”, en dicho predio se encontraron las áreas con bosque permanente, purmas, pastizal, cítricos y plátano, cuyas muestras de suelo se extrajeron de las parcelas: naranjal, pastizal y bosque, cuyo acceso para el lugar de estudio fue por la carretera desde la ciudad de Tingo María a la localidad de Supte San Jorge, con una distancia aproximada de 5 km.

3.1.1. Ubicación política

- Región : Huánuco
- Provincia : Leoncio Prado
- Distrito : Rupa Rupa
- Centro poblado : Supte San Jorge

3.1.2. Ubicación geográfica

Las parcelas de estudio se encuentran ubicadas en el centro poblado Supte San Jorge de la ciudad Tingo María, cuyas coordenadas UTM WGS84 se detallaron en la Tabla 2:

Tabla 2. Localización geográfica de los predios de estudio

Parcelas	Coordenadas UTM (WGS84-18S)		Altitud (m s.n.m.)
	Este	Norte	
Naranjal	394623	8972851	671
Pastizal	394624	8972633	693
Bosque	394495	8972783	665

3.1.3. Propiedades generales

3.1.3.1. Climatología

La estación meteorológica de Supte San Jorge reportó una precipitación acumulada entre los meses de diciembre del 2022 y setiembre del 2023 de 2 076.20 mm, teniendo una humedad relativa media de 82.25 %, una temperatura media de 26,64 °C, una temperatura máxima de 30,60 °C y una temperatura mínima de 20,68 °C,

registrándose una temperatura baja en el mes de diciembre. Asimismo, el SENAMHI categorizó la climatología como cálido húmedo-lluvioso con precipitaciones pluviales frecuentes (SENAMHI, 2021).

3.1.3.2. Suelos

Presentan una clase textural de suelo franco arcilloso con un pH fuertemente ácido a moderadamente alcalino con presencia de toxicidad de aluminio para la mayoría de los cultivos (Paredes, 2023).

3.1.3.3. Accesibilidad

La accesibilidad al centro poblado de Supte San Jorge se caracteriza por su ubicación estratégica a 4 km del centro urbano del distrito de Rupa Rupa, conectado mediante la intersección entre la carretera nacional Rupa Rupa-Padre Felipe Luyando. El tiempo medio de desplazamiento desde la ciudad es de 10 minutos en transporte público y 8 minutos en vehículo privado, con un coste aproximado de 3 nuevos soles.

3.2. Material y equipos

Las herramientas y materiales empleados para el presente estudio fueron: machete, formato para recolección de datos, tablero, wincha de 5 m, cinta métrica de 50 m y el tubo muestreador de suelos.

Los equipos que se emplearon fueron: receptor GPS (sistema de posicionamiento global) Garmin 64S, medidor de pH portátil, cámara fotográfica y el computador portátil.

Los softwares empleados para el presente estudio fueron: ArcMap v. 10.5 y el Microsoft Excel 2019.

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Nivel de investigación

Descriptiva, ya que se describieron las concentraciones del pH en los suelos, además se interpoló y se realizó la distribución espacial para conocer la variabilidad de la acidez en las parcelas de cultivos de naranjal, pastizales y de bosque (Hernández et al., 2014).

3.3.2. Tipo de investigación

Aplicada, se cuantificó y describió las concentraciones de la acidez de los suelos donde se conoció la variabilidad espacial del pH por la interpolación del kriging ordinario en los suelos de cultivos de naranjal, pastizales y de bosque (Camirra y Cartaya, 2009).

3.3.3. Variables de estudio

- **Variable independiente (X)**
Variabilidad espacial del pH.

- **Variable dependiente (Y)**
Sistemas de uso del suelo.

- **Variables intervinientes**
Especies vegetales, variables climáticas, geografía, entre otros.

3.3.4. Diseño de investigación

Diseño no experimental, transversal, descriptivo, se describió la distribución de la variabilidad espacial de la acidez en los suelos por la interpolación de kriging ordinario, cuyo periodo de evaluación será en los meses de diciembre del 2022 y setiembre del 2023 (Hernández et al., 2014).

3.3.5. Población

Compuesta por todos los suelos cuyos usos del suelo fueron: naranjal, pastizal y bosque del predio denominado “Carlos Maby”, ubicada en el distrito de Rupa Rupa – Huánuco.

3.3.6. Muestra

Compuesta por tres parcelas cuyos usos del suelo fueron: naranjal, pastizal y bosque, donde cada parcela evaluada tuvo un área de 10 000 m², cuyo tipo de muestreo fue el muestreo no probabilístico por conveniencia (Arias et al., 2022).

3.3.7. Técnicas de investigación

Observacional, donde se extrajeron y procesaron las muestras de los suelos estudiados, que posteriormente fueron llevados para su análisis al laboratorio de la UNAS (Hernández, 2011).

3.3.8. Instrumentos de investigación

Ficha observacional (cuaderno de campo y análisis de laboratorio), donde se apuntaron las coordenadas de cada muestra de estudio para su posterior análisis en la acidez de los suelos (Arias, 2020).

3.3.9. Análisis estadístico

Pruebas estadísticas descriptivas e inferenciales, la cual comprende lo siguiente: media, mediana, desviación estándar (D.E.), coeficiente de variación (C.V.), asimetría, curtosis, prueba de t de student para muestras emparejadas y la interpolación espacial de kriging ordinario, para la determinación de la variabilidad espacial del pH en los suelos naranjal, pastizal y bosque.

3.4. Metodología

3.4.1. Descripción del contenido de pH en tres sistemas de uso del suelo

Los tres suelos de los predios (pastizal, bosque y naranjal) donde se extrajeron 16 monolitos de suelos cuyo distanciamiento entre cada monolito fue de 20 x 20 m en las tres parcelas de 10 000 m² de área estudiado cada uno, tal como se observa en la Figura 2, 3 y 4, asimismo, cada muestra tuvo un área de 1 x 1 x 0,3 m que tuvieron cada monolito 1 kg de peso, siguiendo lo propuesto por el (MINAM, 2014; Melchiori et al., 2000), donde cada muestra de suelo recolectada tuvo un distanciamiento de aproximadamente 20 m de distanciamiento la cual se siguió lo propuesto por Wollenhaupt et al. (1994), posteriormente se llevaron al laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para su análisis del pH cuyo procesamiento fue por el método del potenciómetro en proporción del agua:suelo (1:1) (NOM-021-RECNAT – 2000, 2002), para finalmente determinar la acidez en las parcelas de estudio y su estadística descriptiva empleando la media, mediana, asimetría, curtosis, desviación estándar (D.E.) y el coeficiente de variación (C.V).

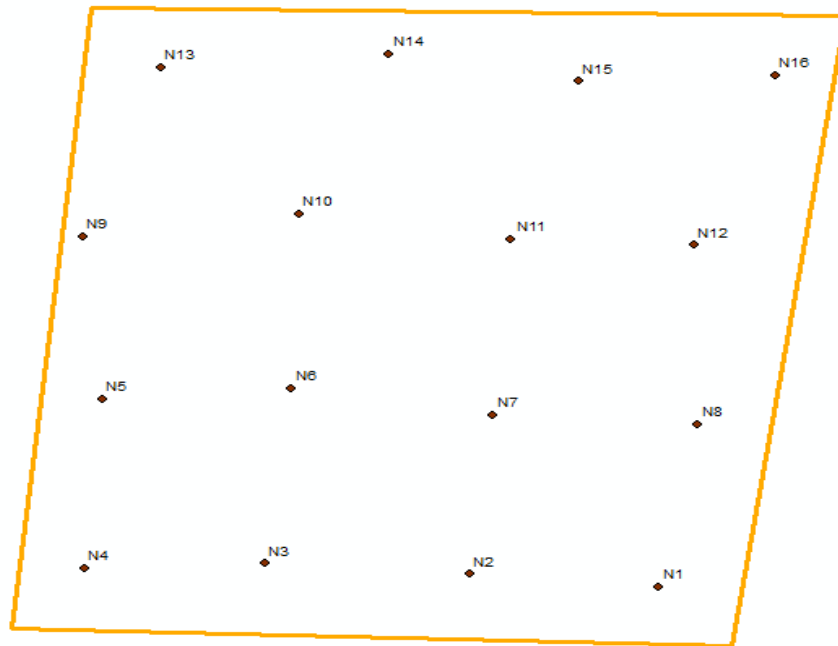


Figura 2. Predio naranjal con sus respectivas muestras de suelo

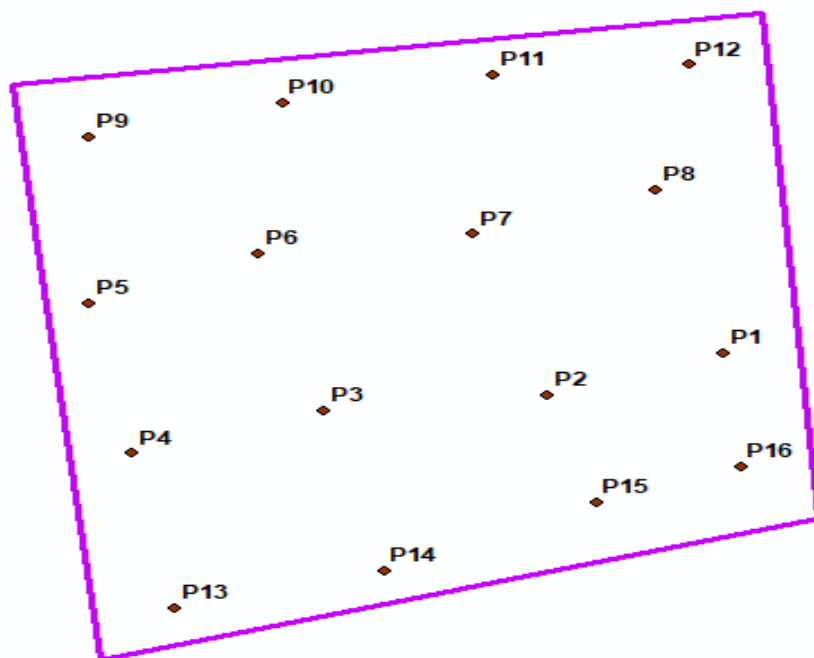


Figura 3. Predio pastizal con sus respectivas muestras de suelo

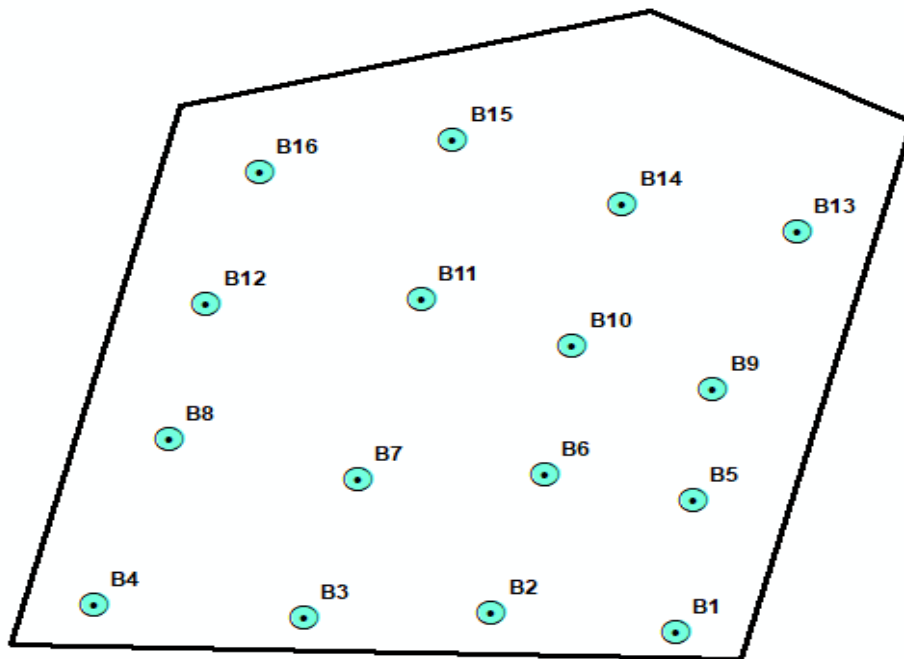


Figura 4. Predio de bosque con sus respectivas muestras de suelo

3.4.2. Determinación del semivariograma del pH en tres sistemas de uso del suelo

A. Análisis exploratorio de datos

Para la construcción del semivariograma del pH en los tres sistemas de uso, inicialmente se inició con el análisis geoestadístico, para ello se analizó en cuatro pasos, en **primer lugar**, fue la generación del histograma para normalizar los datos obtenidos en campo, obteniéndose una distribución gaussiana y observando si los datos necesitan o no una transformación y brindando como resultado valores de la estadística descriptiva (media, mediana, desviación estándar, asimetría y curtosis). En **segundo lugar**, fue la generación de la gráfica de la normalidad por la “Normal QQPlot” donde se determinó que los datos obtenidos fueron normalmente distribuidos, y con ello se conoció que cumplió la condición de normalidad antes de la aplicación de la interpolación. En **tercer lugar**, fue la generación del mapa voronoi ya que se conoció la dispersión de los datos obtenidos que fueron representados en la superficie del terreno y distribuyendo espacialmente los valores reportados. Finalmente, en **cuarto lugar**, se realizó el análisis de tendencia ya que se el comportamiento central de la variable en función de la ubicación geográfica, cuya detección y ajuste de la tendencia permitió aislar la estructura espacial real brindando mejores predicciones (Tello, 2023).

B. Análisis estructural (modelo de la interpolación)

Para el modelado de la interpolación se aplicó dos modelos de interpolación geoestadística Kriging Ordinario y la interpolación IDW, donde se realizó un análisis geoestadístico obteniéndose un modelo con una eficiencia de predicción obtenida de los valores reportados de los predios de naranjal, pastizal y de bosque, asimismo, para la interpolación y construcción del semivariograma del pH en los tres sistemas de uso, se aplicó según lo propuesto por (Mulla y McBratney, 2000). Asimismo, el semivariograma se estimó por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} * \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_i - Z_{i+h}]^2 \quad (2)$$

Donde:

“ $\gamma(h)$ ”, es el valor de semivarianza obtenido entre pares de valores;

“ h ”, es la distancia de separación entre los puntos x_i y x_{i+h} ,

“ z_i y z_{i+h} ” son los valores medidos para la variable regionalizada en los puntos x_i o x_{i+h} y

“ $n(h)$ ” es el número de pares en cualquier distancia de separación h

Para la interpolación del kriging ordinario, el semivariograma experimental se construyó graficando con los valores de $\gamma(h)$ en función de los intervalos de distancia “ h ” para una dirección específica. Siguiendo los principios teóricos, la semivarianza aumentó progresivamente con la distancia entre los puntos muestreados (cada 20 metros) hasta alcanzar un valor constante denominado "sill" o meseta ($C_0 + C$). La distancia a la que se estabiliza este valor se conoce como "rango" (A_0), que define el grado de dependencia espacial (Zarazúa et al., 2007). Adicionalmente, se calculó el grado de dependencia espacial (GDE) mediante la relación efecto nugget / sill. Este indicador se clasifica de la siguiente manera: dependencia espacial fuerte: valores menores al 25 %, dependencia moderada: entre 25-75 % y la dependencia débil: valores superiores al 75 % (Jaramillo et al., 2012; Cambardella et al., 1994). De igual manera, Cristóbal (1996) sugirió realizar la interpolación sustituyendo el semivariograma experimental por modelos matemáticos continuos, entre los cuales se encuentran el modelo lineal, exponencial, gaussiano y esférico. Por esta razón, en el presente estudio el modelo lineal fue el que mejor se ajustó a los datos y presentó el menor error para los tres usos del suelo. De igual manera, para la interpolación del IDW se aplicó lo propuesto por Saad (2024), donde se interpoló espacialmente en puntos no muestreados basándose en los

valores de los puntos medidos vecinos, ya que se asumieron los valores de las ubicaciones no muestreadas que fueron más similares a los puntos medios cercanos que a los más lejanos, para ello se evaluaron los parámetros de la distancia donde se conoció la influencia de cada valor predicho, luego el parámetro de potencia (p) ya que se determinó la rapidez con la que la influencia de un punto muestreado se redujo al aumentar la distancia. Seguidamente, el número de muestras, cuyos puntos muestreados utilizados en la estimación afectó a la precisión de los valores previstos teniéndose un total de 16 puntos de muestreo en cada sistema de uso del suelo, en la validación de la interpolación se consideraron el error cuadrático medio (RMSE) y el error medio (EM) del modelo, y cuando se cumpla la condición que el RMSE se aproxima a cero, ello indica que el modelo fue precisamente predicho, es por ello que la ecuación del IDW se expresa como:

$$Z(x) = \frac{\sum_i w_i * z_i}{\sum_i w_i} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{1}{d_i^2} \quad (4)$$

Donde:

Z(x): Es el punto que se va a estimar o predecir.

Z_i: Es el punto medido (conocido).

d_i²: Es la distancia entre el punto medido y el punto que se va a estimar o predecir.

W_i: Es el peso.

Seguidamente, Moreno (2008) señala cuales son las ecuaciones de error en la predicción del modelo las cuales son las siguiente:

a) Media de los errores: valor cercano a 0.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{n} \quad (5)$$

b) Media estandarizada de los errores: valor cercano a 0.

$$MEE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n} \quad (6)$$

c) Error cuadrático medio: Mientras el valor es menor, la predicción será mejor:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)]^2}{n}} \quad (7)$$

d) Error estándar medio: El error debe de ser cercano al error cuadrático medio

$$EEM = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}(s_i)}{n} \quad (8)$$

e) Error cuadrático medio estandarizado: Mientras los valores sean aproximados al 1, los errores de predicción serán validados.

$$ECME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z(s_i) - Z(s_i)] / \hat{\sigma}(s_i)]^2}{n}} \quad (9)$$

Donde:

$\hat{\sigma}(s_i)$ = Desviación estándar

$\hat{Z}(s_i)$ = Valor promedio observado

$Z(s_i)$ = Valor observado de la variable en el punto “s”

n = Número de observaciones

f) Eficiencia de predicción (EP): Un valor de 100 indica predicciones perfectas, valores más bajos o valores negativos indicaron una estructura espacial deficiente y no se pudieron agrupar estrechamente para crear un mapa, y en su lugar se usó el promedio general (Kravchenko, 2003).

$$EP = (1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n [Z(s_i) - z_{pred.}]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(s_i) - \hat{Z}(s_i)]^2} \right\}) * 100 \quad (10)$$

Donde:

$\hat{Z}(S_i)$ = Valor promedio observado

$Z(S_i)$ = Valor observado de la variable en el punto S_i

$Z_{pred.}$ = Valor predicho en el punto S_i

N = Número de observaciones

Finalmente, se llevó a cabo la distribución proporcional de los rangos de la escala de acidez, junto con sus respectivas interpretaciones, siguiendo las directrices establecidas por el MIDAGRI (2022).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del contenido de pH en tres sistemas de uso del suelo

Tabla 3. Estadística descriptiva del pH en las parcelas evaluadas

Parcelas		Media	Mediana	Moda	D.E.	C.V.	Varianza	Asimetría (AS)	Curtosis (K)
pH naranjal	Inicial	6,59	6,58	6,58	0,388	5,89	0,15	0,0199	-0,333
	Final	6,11	6,17	6,24	0,323	5,29	0,105	0,984	0,192
pH pastizal	Inicial	6,97	7,08	7,11	0,275	3,95	0,076	-1,196	-0,363
	Final	6,74	6,765	6,77	0,268	3,98	0,072	1,171	0,130
pH de bosque	Inicial	5,76	5,705	5,85	0,35	6,07	0,12	1,768	1,399
	Final	7,17	7,42	---	0,67	9,35	0,45	-0,799	-0,893

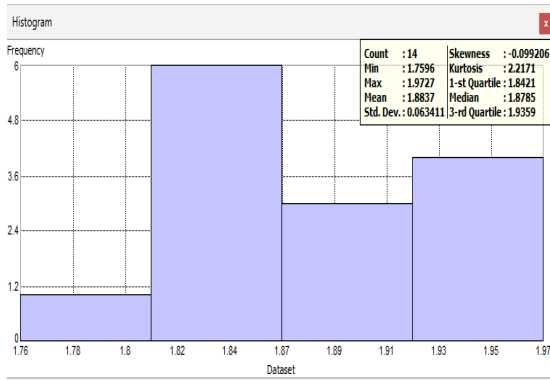
Nota: D.E., desviación estándar; C.V., coeficiente de variación; AS, asimetría; K, curtosis.

La Tabla 3, se reportaron los valores de la estadística descriptiva, donde la media y la mediana tuvieron valores aproximados, asimismo se encontraron valores de la moda que fueron los valores repetitivos en cada análisis obtenido en campo, de igual manera, se reportaron la desviación estándar (D.E.) en la cual se reportó una homogeneidad en los valores encontrados, asimismo, el coeficiente de variación (C.V.) se encontró una variación muy baja entre los valores reportados, asimetría (AS) se encontró que para pH inicial y final de cultivos de naranjal, el pH final del suelo pastizal y el pH inicial del suelo de bosque cumplieron la condición $[AS > 0]$ en consecuencia se tuvo una asimetría de tendencia a la derecha, pero para el pH inicial del suelo pastizal y el pH final del suelo de bosque cumplieron la condición $[AS < 0]$ en consecuencia se tuvo una asimetría de tendencia a la izquierda, finalmente, la curtosis (K) para el pH final de cultivos de naranjal, el pH final del suelo pastizal y el pH inicial del suelo de bosque cumplieron la condición $[K > 0]$ tiene una conducta Leptocúrtica, pero para el pH inicial de cultivos de naranjal, el pH inicial del suelo pastizal y el pH final del suelo de bosque cumplieron la condición $[K < 0]$ tiene una conducta Platicúrtica, se evidenciaron en los suelos de uso naranjal, pastizal y el bosque en el periodo de evaluación de diciembre del 2022 y setiembre del 2023 en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado - Huánuco. Estos resultados son similares a lo reportado por Medina (2022) quien encontró una media de 5,34, una D.E. de 0,75, un C.V. de 0,14 %, una asimetría de 0,56 y una curtosis de -0,51, esto fue debido a que tuvo una temperatura media de 19,3 °C, precipitación anual de 782,7 mm a una altitud de 1 470 a 3 000 m s.n.m, asimismo, con una clase textural de franco arcillosas con un suelo fuertemente ácido a neutro, además influyó la

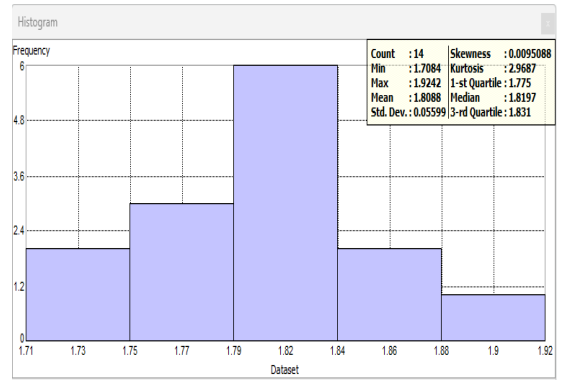
fertilización nitrogenada ocasionando una acidez al suelo en cultivos boscosos. Asimismo, tuvo una similitud a lo reportado por Arciniegas y Gomez (2018) encontró un pH medio de 4,1 y un C.V. de 5,48 %, esto fue debido a que tuvo una temperatura media de 28,9 °C, una precipitación anual de 4 008 mm y una humedad relativa media de 76 % a una altitud de 467 m s.n.m., teniendo un suelo extremadamente ácido ocasionando una pérdida de nutrientes, un efecto de toxicidad y cambios estructurales al suelo, asimismo, reportó una alta heterogeneidad en cultivos de cítricos. Por último, tuvo una similitud a lo reportado por Hernandez et al. (1994) descubrieron un pH medio de 7,62, una D.E. de 0,64, un C.V. de 0,08 %, una asimetría de -1,05 y una curtosis de 0,29, esto fue debido a que desarrolló en un bosque muy seco y un bosque seco tropical a una temperatura media de 28 °C con una precipitación anual de 1 400 mm, cuya taxonomía fue Lithic Haplustalfs, además, tuvo poca variabilidad entre los valores reportados, cuyo nugget y sill son cercanos a 0, cuyo modelo del semivariograma fue el esférico en suelos boscosos. Asimismo, esto podría atribuirse a lo señalado por Nava-Pacheco (2022) quien recomienda que el pH del suelo para los cítricos se mantenga en un rango de 5,5 a 6,8, ya que si fuera inferior de 5,5 ocasionaría una limitada disposición de los nutrientes en el suelo. Sánchez et al. (2023) recomienda que el pH del suelo suele ser ligeramente ácido a neutro de 5.5 y 7.0 en los bosques tropicales y secos, mientras que Torres (2024) señala que en los bosques húmedos el pH puede ser más ácido, a menudo por debajo de 5.5, ocasionando suelos con alta retención de humedad y materia orgánica. Además, Serrano et al. (2010) señala que el CIC, el porcentaje de arcilla y la concentración de sales influyen en el pH de los suelos de cultivos pastizales. Por último, Bonomo y Rodríguez (2020) señalan que los sistemas pastoriles presentan alta diversidad espacial de la acidez en suelos de pastizal, así como la distribución de los animales en pastoreo.

4.2. Determinación del semivariograma del pH en tres sistemas de uso de los suelos

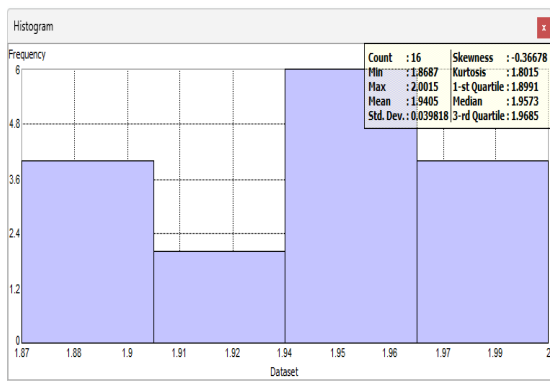
En la Figura 5, 6 y 7, se observa el comportamiento del histograma, prueba de normalidad y el mapa Voronoi del pH en los sistemas de uso del suelo (naranjal, pastizal y bosque).



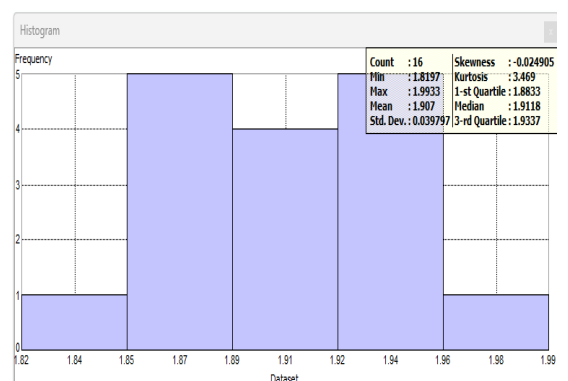
(a) Predio naranjal inicial



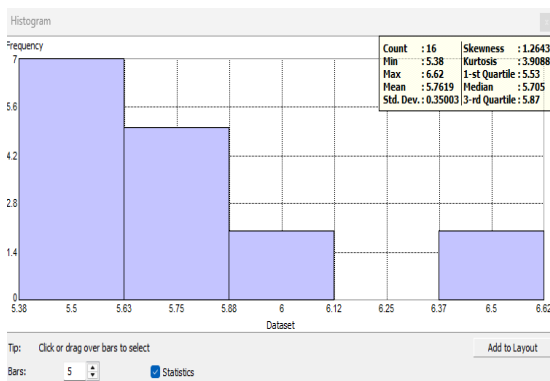
(b) Predio naranjal final



(c) Predio pastizal inicial



(d) Predio pastizal final

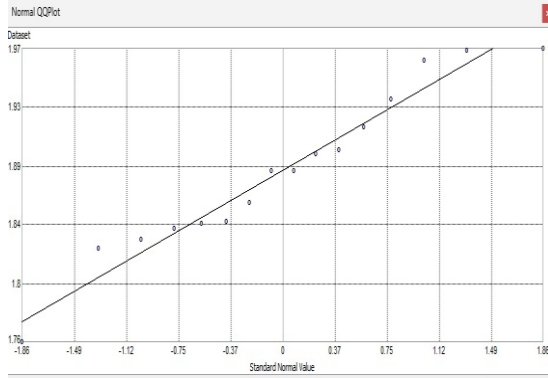


(e) Predio bosque inicial

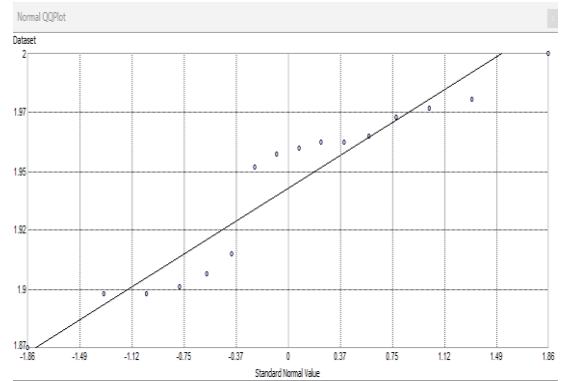


(f) Predio bosque final

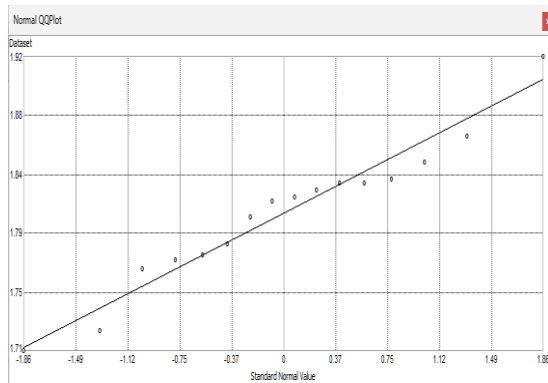
Figura 5. Histogramas de los sistemas de uso del suelo al inicio y final



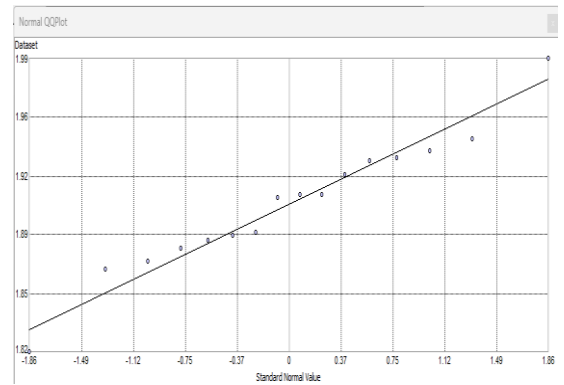
(a) Predio naranjal inicial



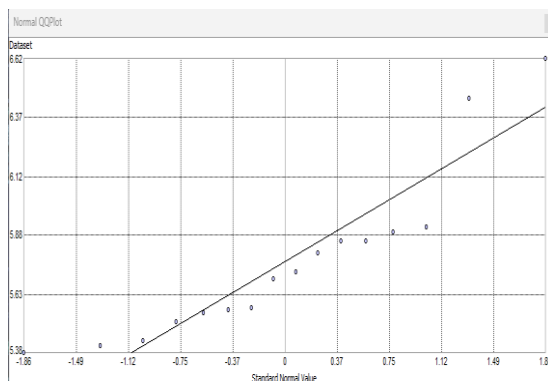
(b) Predio naranjal final



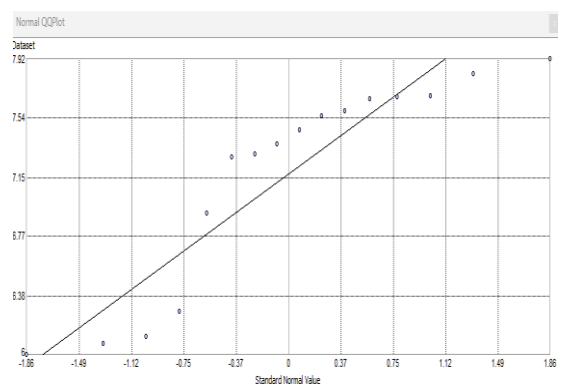
(c) Predio pastizal inicial



(d) Predio pastizal final

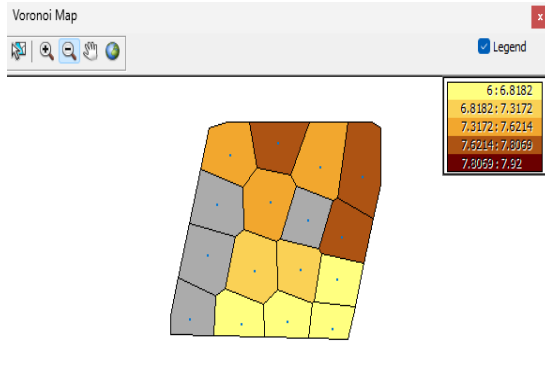


(e) Predio bosque inicial

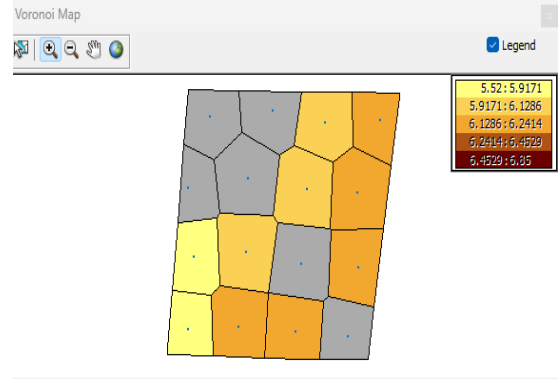


(f) Predio bosque final

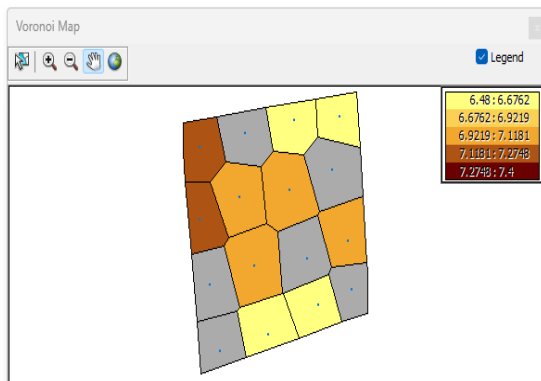
Figura 6. Prueba de normalidad de los sistemas de uso del suelo al inicio y final



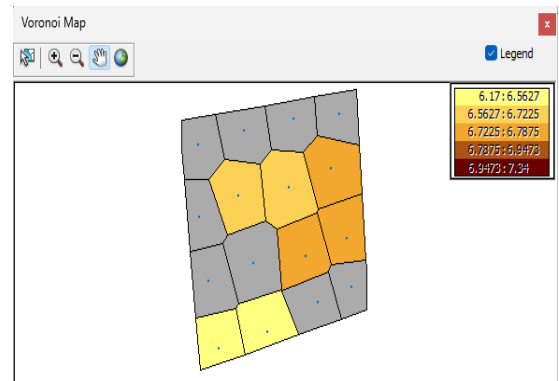
(a) Predio naranjal inicial



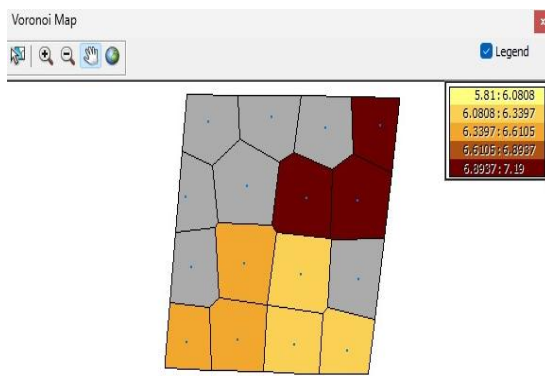
(b) Predio naranjal final



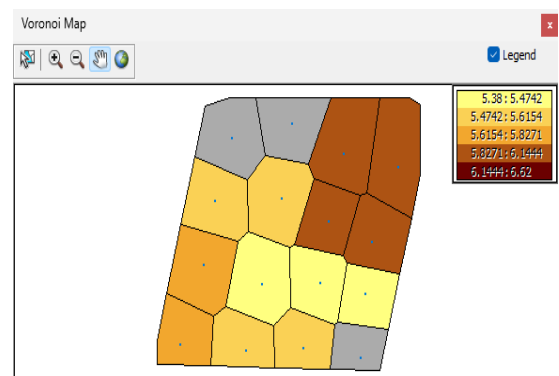
(c) Predio pastizal inicial



(d) Predio pastizal final



(e) Predio bosque inicial



(f) Predio bosque final

Figura 7. Mapa voronoi de los sistemas de uso del suelo al inicio y final

Tabla 4. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio naranjal inicial

Rango	Interpretación
5,81 - 6,08	M.A
6,08 – 6,34	M.A. - L.A.
6,34 – 6,61	L.A. - N
6,61 - 6,89	N
6,89 – 7,19	N

Nota. M.A: Moderadamente ácido, L.A: Ligeramente ácido, N: Neutro

Tabla 5. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio naranjal final

Rango	Interpretación
5,52 – 5,92	F.A. – M.A.
5,92 – 6,13	M.A. – L.A.
6,13 – 6,24	L.A.
6,24 - 6,45	L.A.
6,45 – 6,85	N

Nota. F.A: Fuertemente ácido, M.A: Moderadamente ácido, L.A: Ligeramente ácido, N: Neutro

Tabla 6. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio pastizal inicial

Rango	Interpretación
6,48 – 6,68	L.A. - N
6,68 – 6,92	N
6,92 – 7,12	N
7,12 – 7,27	N
7,27 – 7,40	N – L. Al

Nota. L.A: Ligeramente ácido, N: Neutro, L. Al : Ligeramente alcalino

Tabla 7. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio pastizal final

Rango	Interpretación
6,17 – 6,56	L.A.
6,56 – 6,72	L.A. - N
6,72 – 6,78	N
6,78 – 6,95	N
6,95 – 7,34	N

Nota. L.A: Ligeramente ácido, N: Neutro

Tabla 8. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio bosque inicial

Rango	Interpretación
6,00 – 6,82	M.A. - N
6,82 – 7,32	N
7,32 – 7,62	N – L. Al.
7,62 – 7,81	L. Al.
7,81 – 7,92	L. Al. - M. Al.

Nota. M.A: Moderadamente ácido, N: Neutro, L. Al : Ligeramente alcalino, M. Al : Moderadamente alcalino

Tabla 9. Rangos de pH del mapa Voronoi del predio bosque final

Rango	Interpretación
5,38 – 5,47	F.A.
5,47 – 5,62	F.A. – M.A.
5,62 – 5,83	M.A.
5,83 – 6,14	M.A. – L. A.
6,14 – 6,62	L. A. – N

Nota. F.A: Fuertemente ácido, M.A: Moderadamente ácido, L.A: Ligeramente ácido, N: Neutro

En la Figura 5, se observó el comportamiento del histograma la cual todas presentaron una dispersión normal, también se obtuvo los valores de la estadística descriptiva ya que en casi todas las parcelas y evaluaciones a excepción del pH de bosque inicial (ninguna) tuvieron una transformación logarítmica, esto va en concordancia con lo encontrado en la Figura 6, que se muestra la prueba de normalidad, ya que se reafirma las transformaciones realizadas a la función logarítmica a excepción del pH de bosque inicial (ninguna), mostrándose los valores obtenidos en campo cerca de la línea recta de la normalidad, seguidamente, en la

Figura 7 y las Tabla 4, 5, 6, 7, 8 y 9, donde se observa el mapa voronoi el comportamiento de los valores atípicos en los polígonos de Thiessen por el modelo de Cluster, observándose una variabilidad espacial del pH en los tres sistemas de uso del suelo.

Tabla 10. Análisis exploratorio de datos en la primera evaluación (Diciembre)

Parámetro químico	Análisis exploratorio de datos						
	TF	Media	Mediana	D.E	C.V	Asimetría (AS)	Kurtosis (K)
pH naranjal (inicial)	Log	1,884	1,884	0,059	3,134	-0,108	2,534
pH pastizal (inicial)	Log	1,941	1,957	0,039	2,05	-0,367	1,802
pH bosque (inicial)	Ninguna	5,762	5,705	0,350	6,075	1,264	3,991

Nota: TF, Transformación; D.E., desviación estándar; C.V, coeficiente de variación

Tabla 11. Análisis exploratorio de datos en la segunda evaluación (Setiembre)

Parámetro químico	Análisis exploratorio de datos						
	TF	Media	Mediana	D.E	C.V	Asimetría (AS)	Kurtosis (K)
pH naranjal (final)	Log	1,809	1,819	0,053	2,921	0,00031	3,218
pH pastizal (final)	Log	1,907	1,912	0,039	2,087	-0,025	3,469
pH bosque (final)	Log	1,965	2,004	0,098	4,964	-0,864	2,132

En la Tabla 10 y 11, se observa el exploratorio de datos del pH en diferentes sistemas de uso del suelo (naranjal, pastizal y bosque) tanto inicial y final del periodo de evaluación, donde todas presentaron una transformación logarítmica, asimismo, se encontraron los valores de la estadística descriptiva de los modelos para la construcción del semivariograma, demostrándose que tienen poca variabilidad y error. Esto es diferido por Tello (2023) quien encontró una transformación del modelo fue Box Cox (0,4), una media de 1,72, una mediana de 1,74, una asimetría de -0,56 y una curtosis de 2,51, esto fue debido a que tuvo un índice de calidad alto, además, de presentar una correlación positiva entre el calcio y la materia orgánica

respecto al pH del suelo, además, de tener un modelo esférico con una media de error de 0,01 y una eficiencia de predicción de 99,84 % en el cultivo de café. De igual manera, es diferido lo reportado por Aróstegui (2022) quien encontró una transformación del modelo fue Box Cox (0,4), una media de 4,35, una D.E. de 1,74 y un C.V. de 7,64 %, esto fue debido a que los suelos fueron de fuertemente ácidos a extremadamente ácidos, una baja calidad productiva de los suelos, un mapa de Voronoi de polígonos homogéneos, además, reportó que la semivarianza de los datos se incrementa en relación directa a la distancia encontrada, además, tuvo un método geoestadístico de pH circular con un error medio de 0,0053 y una eficiencia de predicción de 14 % en cultivos de palma aceitera. Esto puede deberse a lo señalado por Moreno (2008) quien señala que los valores más cercanos a una distribución normal necesitan transformaciones de los datos. Asimismo, Archundia (2011) señala que el análisis exploratorio de datos es relevante por las transformaciones en los valores atípicos encontrados y en la asimetría de los datos reportados.

Tabla 12. Propiedades del semivariograma empleando Kriging del pH en los sistemas de uso del suelo en la primera medición

Parámetro químico	Propiedades del semivariograma del pH en los sistemas de uso del suelo						
	Tipo	Función núcleo	Modelo	Nugget	Sill	Rango	GDE (%)
pH naranjal (inicial)	Ko	Exponencial	Estable	0,00166	0	114,9487	0
pH pastizal (inicial)	Ko	Exponencial	Estable	0,00085	0,00007	112,7312	12,14
pH bosque (inicial)	Ko	Exponencial	Estable	0,05436	0	115,175	0

Nota. Ko: Kriging ordinario, GDE: grado de dependencia espacial

Tabla 13. Propiedades del semivariograma empleando Kriging del pH en los sistemas de uso del suelo en la segunda medición

Parámetro químico	Propiedades del semivariograma del pH en los sistemas de uso del suelo						
	Tipo	Función núcleo	Modelo	Nugget	Sill	Rango	GDE (%)
pH naranjal (final)	Ko	Exponencial	Estable	0,00099	0	114,9487	0
pH pastizal (final)	Ko	Exponencial	Estable	0,00086	0	112,7312	0
pH bosque (final)	Ko	Exponencial	Estable	0,001992	0	115,175	0

Nota. Ko: Kriging ordinario, GDE: grado de dependencia espacial

En la Tabla 12 y 13, se observan las propiedades del semivariograma empleando Kriging ordinario del pH en los sistemas de uso del suelo donde en todas se aplicó el modelo “stable” la cual se tuvo un nugget y un sill cercanos a 0, asimismo, un GDE de 0 eximiéndose del pH inicial del pastizal que fue 12,15 %, indicando que tiene una dependencia espacial fuerte porque cumple con la condición ($GDE < 25 \%$). Es por ello, que muestra similitud a lo reportado por Tello (2023) quien encontró un nugget de 0 %, rango de 56,20 m, sill de 0,01, un grado de dependencia espacial de 0 % y un modelo de “stable” en plantaciones de café debido a que tuvo un pH de fuertemente ácido a neutro, predominando el 65,39 % el suelo moderadamente ácido en cultivos de café de 2 a 6 años, asimismo, reportando una alta calidad del suelo albergando el 41,92 % del terreno estudiado. De igual manera, mostró una similitud a lo reportado por Medina (2022) quien encontró un nugget de 0,3406 %, rango de 2834,53 m, sill de 0,5107, un GDE de 0,67 % y un modelo de “esférico” en un bosque de pino-encino debido a que tuvo una temperatura media de 19,3 °C, precipitación anual de 782,7 mm, una evapotranspiración anual de 1 988 mm y una altitud de 1 470 a 3 000 m s.n.m, asimismo, con una clase textural de franco arcillosas con un suelo fuertemente ácido a neutro, además influyó la fertilización nitrogenada ocasionando una mayor acidez al suelo. Pero se discrepa lo reportado por Arciniegas y Gomez (2018) quien encontró un nugget de 0,068 %, rango de 91,52 m, sill de 0,365, un grado de dependencia espacial de 81,25 % y un modelo de “gaussiano” en un terreno de cítricos y cultivos de guanábana debido a que tuvo una temperatura media de 28,9 °C, una precipitación anual de 4 008 mm y una humedad relativa media de 76 % a una altitud de 467 m s.n.m., teniendo un suelo extremadamente ácido ocasionando una pérdida de nutrientes, un efecto de toxicidad y cambios estructurales al suelo, asimismo, reportó una alta heterogeneidad en los suelos. Esto podría deberse a lo señalado por Cambardella et al. (1994) y Yasrebi et al. (2008) quienes señalan que un GDE depende de la climatología, relieve, organismos bióticos, suelos encalados, etc.

Tabla 14. Propiedades del semivariograma empleando IDW del pH en los sistemas de uso del suelo de la primera medición

Parámetro químico	Búsqueda del vecindario							
	Potencia (p)	Tipo de vecindario	Vecino máximo	Vecino mínimo	Tipos de sectores	Ángulo	Semieje mayor	Semieje menor
pH naranjal (inicial)	2	Estándar	15	10	8	0	23,19012	23,19012
pH pastizal (inicial)	2	Estándar	15	10	8	0	24,00105	24,00105
pH bosque (final)	2	Estándar	15	10	8	0	25,21022	25,21022

Tabla 15. Propiedades del semivariograma empleando IDW del pH en los sistemas de uso del suelo de la segunda medición

Parámetro químico	Búsqueda del vecindario							
	Potencia (p)	Tipo de vecindario	Vecino máximo	Vecino mínimo	Tipos de sectores	Ángulo	Semieje mayor	Semieje menor
pH naranjal (final)	2	Estándar	15	10	8	0	23,19012	23,19012
pH pastizal (final)	2	Estándar	15	10	8	0	24,00105	24,00105
pH naranjal (final)	2	Estándar	15	10	8	0	25,21022	25,21022

En la Tabla 14 y 15, se observan las propiedades del semivariograma empleando el IDW del pH en los sistemas de uso del suelo donde en todas se aplicó el parámetro de potencia (p) de valor 2, cuyo tipo de vecindario fue estándar, asimismo, el valor del vecino máximo de 15 y el mínimo de 10, de igual manera, se tuvo 8 tipos de sectores con un ángulo de 0, finalmente, el semieje mayor y menor fueron iguales tanto en la medición inicial y final. Es por ello, que muestra similitud a lo reportado por Navarro (2017) quien encontró una potencia (p) de 2, vecino máximo de 15, vecino mínimo de 10, cuyo tipo de sector fue de 1, esto se debió a que tuvo un error medio de -0,68 y un error cuadrático medio de 9,48, con un histograma de transformación logarítmica, a un pH medio de 4,9 con un clima semicálido y muy húmedo, 1 500 a 1 800 mm de precipitación anual, una humedad relativa de 80 a 90 %, a una temperatura media de 17° C en una interpolación de IDW de muestreo aleatorio para un suelo de pastizal de *Setaria sphacelata* (Schumach) en el distrito de Oxapampa-Pasco. De igual manera, muestra similitud a lo reportado por Liu et al. (2013) quien encontró una potencia (p) de 2, vecino máximo de 15, vecino mínimo de 10, esto se debió a que tuvo un error medio de -0,68, un error absoluto medio de 0,1818, un error cuadrático medio de 0,2740 y un coeficiente

de eficiencia del modelo de 0,5388, a un pH medio de 8,01 en cultivo de pastos y 6,06 en un suelo forestal con un clima monzónico continental templado, árido y semiárido, 150 a 800 mm de precipitación anual, una humedad relativa de 80 a 90 %, a una temperatura media anual de 3,6 a 14,3 °C, una evaporación potencial anual de 1 200 a 1 400 mm y una radiación solar anual de 5,0 a 6,7 x 10⁹ J/m² en una interpolación de IDW para un suelo de pastizal y de bosque en la meseta de Loess - China. Asimismo, esto podría atribuirse a lo señalado por Villatoro et al. (2008) quien señala que la distribución espacial por la interpolación del IDW es recomendable cuando la potencia es dos ya que el error estándar, la validación cruzada, el coeficiente de la regresión es menor, como también la eficiencia de predicción del modelo es mucho mejor para el pH en cultivos diversos y limpio.

Tabla 16. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging en la primera medición

Parámetro químico	Media de los errores	Error cuadrático medio	Media estandarizada de los errores	Error cuadrático medio estandarizado	Error estándar medio	Valor medio de predicción	Eficiencia de Predicción (%)
pH naranjal (inicial)	0,0148	0,3623	0,0287	1,301	0,2786	6,589	63,67
pH pastizal (inicial)	-0,0216	0,3753	-0,1555	1,8552	0,2082	6,968	69,81
pH bosque (inicial)	-0,0164	0,3953	-0,0681	1,6416	0,2408	5,762	35,61

Tabla 17. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging en la segunda medición

Parámetro químico	Media de los errores	Error cuadrático medio	Media estandarizada de los errores	Error cuadrático medio estandarizado	Error estándar medio	Valor medio de predicción	Eficiencia de Predicción (%)
pH naranjal (final)	0,0223	0,3033	0,0850	1,5899	0,1881	6,113	61,99
pH pastizal (final)	0,0129	0,3148	0,0386	1,6178	0,1986	6,738	49,32
pH bosque (final)	-0,0359	0,5149	-0,1959	1,7313	0,3306	7,175	84,85

En la Tabla 16 y 17, se observa la validación cruzada y la eficiencia de predicción de la interpolación Kriging del pH en diferentes sistemas de uso del suelo (naranjal, pastizal y bosque) tanto inicial y final del periodo de evaluación, se encontraron un error cercano al “0” en especial en la media de los errores y la media estándar de los errores, encontrando que los modelos “stable” son los más adecuados encontrándose así una eficiencia

de predicción deficiente en la estructura espacial ya que son lejanos al 100 %. Estos resultados son similares a lo reportado por Tello (2023) quien encontró una media de los errores de 0,01, un error cuadrático medio de 0,58, una media estandarizada de los errores de -0,03, un error cuadrático medio estandarizado de 1,23 y una eficiencia de predicción de 99,84 %, esto fue debido a que tuvo un índice de calidad alto, además, de presentar una correlación positiva entre el calcio y la materia orgánica respecto al pH del suelo, además, de tener un modelo esférico, tuvo un pH de fuertemente ácido a neutro, predominando el 65,39 % el suelo moderadamente ácido en cultivos de café de 2 a 6 años, a una temperatura media de 20 °C, cuya pendiente fuertemente inclinado a muy escarpado a una altitud de 1 100 y 2 000 m.s.n.m en cultivos de café. De igual manera, una similitud a lo reportado por Medina (2022) quien encontró una media de los errores de 0.019, un error cuadrático medio de 0.025, una media estandarizada de los errores de 0.001 y un error cuadrático medio estandarizado de 0.004, esto fue debido a que tuvo una temperatura media de 19,3 °C, precipitación anual de 782,7 mm, una evapotranspiración anual de 1 988 mm y una altitud de 1 470 a 3 000 m s.n.m, asimismo, con una clase textural de franco arcillosas con un suelo fuertemente ácido a neutro, además influyó la fertilización nitrogenada ocasionando una acidez al suelo en un predio de mezquiales, matorrales y bosques de pino-encino. Por último, tuvo una similitud a lo reportado por Meza (2019) quien encontró una media de los errores de 0.0233, un error cuadrático medio de 0.7885, una media estandarizada de los errores de 0.0234, un error cuadrático medio estandarizado de 1.069 y una eficiencia de predicción de 73.55 %, esto fue debido a que suelos fuertemente ácidos a moderadamente alcalinos, además, de un modelo gaussiano de una clase textural predominante de Franco arcilloso, sin ninguna transformación y poca variabilidad en los datos en una zona boscosa. Pero que fue diferido a lo reportado por Aróstegui (2022) quien encontró una media de los errores de 0,286, un error cuadrático medio de 0,0053, una media estandarizada de los errores de 0,14834, un error cuadrático medio estandarizado de 0,03835 y una eficiencia de predicción de 14 %, esto fue debido a que los suelos fueron de fuertemente ácidos a extremadamente ácidos, una baja calidad productiva de los suelos, un mapa de Voronoi de polígonos homogéneos, además, reportó que la semivarianza de los datos se incrementa en relación directa a la distancia encontrada, además, tuvo un método geoestadístico de pH circular, una temperatura media de 25°C, una precipitación anual de 2 560 mm y una humedad relativa de 87 % en cultivos de palma aceitera. Esto puede deberse a lo señalado por Kravchenko (2003) quien menciona que un valor de 100 % de la eficiencia de predicción, evitando generar mapas con deficiencias, solo utilizándose el promedio general de los datos. Además, Conant et

al. (2011) señala que el pH del suelo se reduce existiendo un aumento de la temperatura, ocasionando un déficit de la materia orgánica del suelo.

Tabla 18. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación IDW en la primera medición

Parámetro químico	Media de los errores	Error cuadrático medio	Valor medio de predicción	Eficiencia de Predicción (EP)
pH naranjal (inicial)	-0,00457	0,3676	6,56	32,24 %
pH pastizal (inicial)	0,0971	0,3003	6,98	4,62 %
pH bosque (final)	-0,0381	0,3889	5,72	3,75 %

Tabla 19. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación IDW en la segunda medición

Parámetro químico	Media de los errores (EM)	Error cuadrático medio (RMSE)	Valor medio de predicción	Eficiencia de Predicción (EP)
pH naranjal (final)	-0,0352	0,3316	6,08	19,23 %
pH pastizal (inicial)	0,0117	0,2919	6,75	7,02 %
pH bosque (final)	0,0022	0,5276	7,17	53,21 %

En la Tabla 18 y 19, se observa la validación cruzada y la eficiencia de predicción de la interpolación IDW del pH en diferentes sistemas de uso del suelo (naranjal, pastizal y bosque) tanto inicial y final del periodo de evaluación, se encontraron un error cercano al “0” en especial en la media de los errores a diferencia del error cuadrático medio, cuya eficiencia de predicción fueron deficientes en la estructura espacial ya que son inferiores al 100 %. Estos resultados son similares a lo reportado por Patel y Pal (2024) quienes encontraron una media de los errores de 0,0007, un error cuadrático medio de 0,630, esto debido a que tuvo un pH medio de 6,28, una curtosis de 0,53, una asimetría de 0,83, una precipitación media anual de 996 a 1 089 mm, temperatura media anual de 21,6 a 33,8 °C, un clima predominantemente cálido y semiárido, una clase textural de franco-arcillosa, una capacidad hídrica disponible de media a muy alta cuyo suelo fue de bosque. Pero difiere lo reportado por Qui et al. (2025) quienes encontraron un error cuadrático medio de 0,08, esto debido a que tuvo un coeficiente de correlación de 0,18, un rango de pH de 4,7 a 8,6, un pH medio de 7,56, una curtosis de 1,14, una asimetría de -1,25, cuyo clima fue monzónico subtropical generalmente cálido y húmedo, poca precipitación, clase textural de suelo fue arenoso con cultivos de arroz, trigo y maíz en la localidad de Taixing – China. Asimismo, es diferido por Navarro (2017) quien

encontró un error cuadrático medio de 9,48 y un error medio de -0,68, esto debido a que se tuvo 55 muestras, un pH medio de 3,31 de transformación logarítmica, una curtosis de 2,23, una asimetría de 0,12, con un clima semicálido y muy húmedo, una precipitación anual de 1 500 a 1 800 mm, una humedad relativa de 80 a 90 %, una temperatura media de 17 °C en una interpolación de IDW de muestreo aleatorio para un suelo de pastizal de *Setaria sphacelata* (Schumach) en el distrito de Oxapampa-Pasco. Esto podría deberse a lo mencionado por Villatoro et al. (2008) quien señala que la interpolación de IDW es menos preciso y deficiente para el pH, Ca y el CICE, no existiendo diferencia significativa debiéndose esta diferencia por la menor densidad de muestras.

Tabla 20. Prueba de T de Student para muestras emparejadas para el pH

Parámetro químico	Coefficiente Correlación de Pearson	Media inicial	Media final	t	GL	p-valor
pH naranjal (ini-fin)	0,119	6,589	6,113	4,014	15	0,0011
pH pastizal (ini-fin)	0,479	6,968	6,738	3,307	15	0,0048
pH de bosque (ini-fin)	0,081	5,762	7,168	-7,696	15	1,38374x10 ⁻⁶

En la **Tabla 20**, se observa la prueba de T de Student cuyo p-valor $< \alpha$ (0,05), donde se rechazó la H_0 y se acepta la H_1 , evidenciándose una variabilidad significativa en la acidez de los suelos del naranjal, pastizal y bosque, reportándose en la etapa inicial y final que fueron evaluados en el periodo de evaluación de diciembre del 2022 y setiembre del 2023 en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa - Huánuco. Siendo semejante lo presentado por Arteaga et al. (2016) quien encontró una diferencia significativa en el suelo de un bosque protector cuya acidez fue de 5,5 a 6,0, esto se debió a que en la reacción del suelo responde a fenómenos propios del suelo, además una alta concentración del nitrógeno ocasiona un incremento de la acidez debido a la formación amonio (NH_4). Esto podría atribuirse a lo señalado por Fassbender (1983) quien señala que las condiciones agroecológicas de un bosque, reportan temperaturas bajas con una alta humedad, afectando la mineralización y el lavado del material orgánico por erosión hídrica en la afectación la acidez del suelo de un bosque.

Tabla 21. Rangos de interpretación del pH en diferentes sistemas de uso del suelo en la interpolación kriging e IDW

Parámetro químico	Descripción		Kriging		IDW	
	Rangos	Interpretación	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
pH naranjal (inicial)	5,6 - 6	Moderadamente ácido	0,09	15,83	0.05	9.13
	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,30	56,16	0.32	58.68
	6,6 - 7,3	Neutro	0,15	28,01	0.17	32.19
pH naranjal (final)	5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	0,16	30,19	0.07	12.94
	5,6 - 6	Moderadamente ácido	0,23	41,96	0.33	61.34
	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,10	18,62	0.12	21.98
pH pastizal (inicial)	6,6 - 7,3	Neutro	0,05	9,24	0.02	3.73
	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,17	25,51	0.10	19.33
	6,6 - 7,3	Neutro	0,37	55,33	0.36	69.49
pH pastizal (final)	7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino	0,13	19,15	0.06	11.17
	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,23	45,21	0.28	54.20
pH bosque (inicial)	6,6 - 7,3	Neutro	0,28	54,79	0.24	45.80
	5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	0,15	24,10	0.04	6.71
	5,6 - 6	Moderadamente ácido	0,19	30,79	0.33	52.09
pH bosque (final)	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,18	29,04	0.23	36.11
	6,6 - 7,3	Neutro	0,10	16,07	0.03	5.10
	5,6 - 6	Moderadamente ácido	0,12	19,09	0.11	18.05
	6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	0,12	19,04	0.14	21.89
	6,6 - 7,3	Neutro	0,22	35,28	0.33	52.94
	7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino	0,11	17,99	0.04	6.29
	7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino	0,05	8,60	0.01	0.83

En la **Tabla 21**, se observan los rangos de interpretación del pH en diferentes sistemas de uso del suelo (naranjal, pastizal y bosque) tanto inicial y final del periodo de evaluación, encontrándose que para el pH naranjal inicial tanto en la interpolación de kriging como el IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es ligeramente ácido, mientras que en el pH naranjal final tanto en la interpolación de kriging como el IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es moderadamente ácido, asimismo, para el pH pastizal inicial tanto en la interpolación de kriging como el IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es de acidez neutra, pero que el pH pastizal final en el kriging existe una mayor área de la parcela que el suelo es de acidez neutra, mientras, que para la IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es ligeramente ácido, seguidamente, para el pH de bosque inicial tanto en la interpolación de kriging como el IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es moderadamente ácido, finalmente, el pH de bosque final tanto en la interpolación de kriging como el IDW existe una mayor área de la parcela que el suelo es de acidez neutra. Es por ello que muestra similitud a lo reportado por Tello (2023) quien encontró una mayor proporción de

área con un pH fuertemente ácido seguido de moderadamente ácido de 17,55 y 16,33 %, respectivamente, esto fue debido a que tuvo un índice de calidad alto, además, de presentar una correlación positiva entre el calcio y la materia orgánica respecto al pH del suelo, además, de tener un modelo esférico con una media de error de 0,01 y una eficiencia de predicción de 99,84 % en el cultivo de café en la interpolación de kriging. Siendo similar a lo encontrado por Ibarra et al. (2009) descubrieron una mayor proporción de área con un pH fuertemente ácido seguido de moderadamente ácido de 61,10 y 38,90 %, respectivamente, esto fue debido a que tuvo una temperatura media de 19,7 °C, precipitación anual de 979 mm a una altitud de 1 600 m.s.n.m, de suelos del tipo regosol, una clase textural de arenosa, además, teniendo suelos fuertemente ácidos y moderadamente ácidos en la interpolación de kriging. De igual manera, fueron similares a lo reportado por Carrillo y Sánchez (2024) quienes encontraron una mayor proporción de área de pH 6,1 – 6,5 siendo 59,6 % del área total, esto fue debido a que tuvo una clase textural de franco con una alta concentración de la materia orgánica, compuesta de 130 muestras de un área total de 1 217,78 Ha de cultivos de café y bosque del distrito de Chirinos – Cajamarca utilizando la interpolación de IDW. Pero difiere lo reportado por Naik et al. (2018) quienes encontraron una mayor proporción de área de pH menores a 6,5 siendo 83 % del área total, esto fue debido a que tuvo una clase textural de franco-arenosos rojos, una concentración baja de nitrógeno, fósforo y potasio, una asimetría de 0,24, una curtosis de 0,49, compuesta de 82 muestras de un área total de 43 500 Ha del suelo de bosque principalmente árboles forestales, una precipitación anual de 1 252 mm, una temperatura media anual de 24-35 °C ubicado en el distrito de Visakhapatnam – India utilizando la interpolación de IDW. Finalmente, se difiere lo reportado por Gonzales (2015) quien encontró una mayor proporción de área de pH de 4,1-4,29 siendo el 31,49 % del área total, esto fue debido a que tuvo principalmente una clase textural de franco arcillo arenoso, una concentración baja de nitrógeno, fósforo y potasio, una unidad fisiográfica relevante siendo terraza baja inundable (TBI), una mayor precipitación en los meses de noviembre a marzo, una temperatura media anual de 25,9 °C, una humedad relativa de 89 % en el cultivo de la palma aceitera ubicado en el distrito Nueva Requena/Curimana – Ucayali utilizando la interpolación de IDW. Esto podría deberse a lo señalado por Aguirre (2001) la fuerte acidez en los suelos está relacionada a la roca madre que subyace en el terreno de estudio. Asimismo, Ruiz et al. (1997) señala que también podría deberse a la actividad agrícola intensiva. Mientras que Villatoro et al. (2008) señalan que una potencia de dos, los coeficientes de determinación de las validaciones cruzadas, y los valores de PAE, CME y EP son ligeramente mejores para el IDW que el Kriging ordinario, asimismo, teniendo una mejor interpolación del IDW a partir de 61 puntos de muestreos principalmente en rangos de pH de

4,70 – 5,80. Finalmente, Edward (1997) señala que también podría deberse a la aplicación de insumos químicos y orgánicos que generan acidez a los suelos.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinó la variabilidad espacial del pH en tres sistemas de uso del suelo encontrándose en el pH naranjal un suelo fuertemente ácido a neutro, mientras que en el pH pastizal un suelo ligeramente ácido a ligeramente alcalino y para el pH de bosque un suelo fuertemente ácido a moderadamente alcalino, existiendo poca variabilidad de la acidez en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa, región Huánuco.
2. La determinación del semivariograma en los sistemas de uso del suelo fue de una interpolación de tipo Kriging ordinario de modelo “stable” cuyo nugget y sill fueron cercanos a 0, pero que el rango fue de 112 a 115 m con un fuerte grado de dependencia espacial, donde la mayor proporción de la acidez para el naranjal fue moderadamente ácido a ligeramente ácido, mientras que para el pastizal fue de 54,79 a 55,33 % siendo un suelo neutro y para el bosque fue moderadamente ácido a neutro, cuya validación cruzada tuvo una media de los errores cercana a cero teniendo un modelo confiable y que la eficiencia de predicción de los modelos construidos fueron entre 42,88-75,09 %, mientras que para la interpolación de tipo IDW tuvo un poder de 2 con 8 tipos de sectores y un tipo de vecindario estándar, donde la mayor proporción de la acidez para el naranjal fue moderadamente ácido a ligeramente ácido, mientras que para el pastizal fue ligeramente ácido a neutro y para el bosque fue moderadamente ácido a neutro, una validación cruzada cuyos errores medio fueron de -0,00457 a 0,0971 y el errores cuadrático medio fueron de 0,2919 a 0,5276 con una eficiencia de predicción de 0,16 – 32,24 % en los suelos de naranjal, pastizal y de bosque en el predio “Carlos Maby” del distrito de Rupa Rupa, región Huánuco.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Se sugiere que debe profundizar en las variables climáticas, geográficas, propiedades fisicoquímicas entre otras que puedan influir en la variabilidad espacial del pH en los suelos de naranjal, pastizal y de bosque en el predio “Carlos Maby” para encontrar un ajuste en el diseño de la interpolación del kriging ordinario.
2. En las parcelas evaluadas de los suelos de naranjal se sugiere la nutrición de los microelementos al suelo para tener una mejor fertilidad, mientras que para el pastizal se sugiere analizar la acidez en relación a la concentración del carbono almacenado en los suelos ya que así conocer la optimización de la fertilidad del suelo y para el bosque se sugiere sembrar arboles forestales para amortiguar acidez de los suelos para mejorar la calidad del suelo.
3. Se recomienda que para tener un semivariograma adecuado y con poco error en el modelo se homogenice la acidez de los suelos como también se sectorice por cultivos en las parcelas evaluadas la acidez adecuada para la no afectación del rendimiento en los cultivos existentes y también la integración en las características fisicoquímicas-biológicas-climáticas en la construcción de la interpolación para la obtención de un modelo con un escaso error en los suelos de naranjal, pastizal y bosque.
4. Se sugiere la aplicación de la interpolación por el método de kriging ordinario por tener menores errores en la predicción y una mayor eficiencia de predicción del modelo a diferencia del IDW para los suelos de naranjal, pastizal y bosque.
5. Se sugiere que los suelos deban ser de valores homogéneos en la acidez y mayor cantidad de muestras de los suelos para que el modelo tenga una interpolación más confiable y con una eficiencia de predicción aceptable, además, debe estudiarse la variabilidad espacial de la acidez por altitudes y con condiciones climáticas y geográficas para conocer los parámetros aceptables en la dispersión del modelo diseñado e interpolado.

VII. REFERENCIAS

- AGROPAL. (8 de noviembre de 2016). El pH del suelo en la agricultura. <https://agropal.com/es/el-ph-del-suelo/>
- Aguirre, G, A. (2001). *Química de los suelos ácidos templados y tropicales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alejo, K. (2023). *Distribución espacio temporal de los parámetros de fertilidad de los suelos de Canchán, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unheval.edu.pe/item/16ef7ed6-6b56-4208-9100-a7d06299fb17>
- Álvarez, E., Viadé, A. y Fernández, M. (2009). Effect of liming with different sized limestone on the forms of aluminium in a Galician soil (NW Spain). *Geoderma*, 152(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.011>
- Anda, M., Shamshuddin, J. y Fauziah, C. (2013). Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research*, 132(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.005>
- Archundia, A. (2011). *Análisis exploratorio de datos en la estimación geoestadística* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional. https://repositorio.unam.mx/contenidos/analisis-exploratorio-de-datos-en-la-estimacion-geoestadistica-413518?c=jaNWbR&d=false&q=*&i=4&v=1&t=search_1&as=0
- Arciniegas y Gomez (2018). Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo [Tesis de pregrado, Universidad de los Llanos]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unillanos.edu.co/server/api/core/bitstreams/6c44dbde-e76a-4f5e-aa9d-d84491836a27/content>
- Arias, J. L. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. Enfoques consulting. <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26118w/Tecnicas%20e%20instrumentos.pdf>
- Arias, J., Holgado, J., Tafur, T. y Vasquez, M. (2022). *Metodología de la investigación: El método ARIAS para desarrollar un proyecto de tesis*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.016>

- Aróstegui, A. (2022). *Distribución espacial de las propiedades del suelo en un área de producción de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq) de Nueva Libertad, provincia de Tocache, departamento de San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/8d79a6d2-09da-4bbf-813c-45dff229aaf2>
- Arteaga, J., Navia J. F. y Castillo, J. A. (2016). Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62-75. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>
- ASTM C702/C702M-18. (2018). *Práctica estándar para reducir muestras de agregado a tamaño para pruebas*. Astm International Helping our world work better. https://www.astm.org/c0702_c0702m-18.html?lang=es-ES
- Auclerc, A., Nahmani, J., Aran, D., Baldy, V., Callot, H., Gers, C. y Guerold, F. (2012). Changes in soil macroinvertebrate communities following liming of acidified forested catchments in the Vosges Mountains (North-eastern France). *Ecological Engineering*, 42(1), 260-269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.024>
- Balzarini, M. (2014). *Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de buenas prácticas*. Editorial Universitaria de Córdoba – EUDECOR. https://www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2016/05/Libro-Buenas-Pr%C3%A1cticas_BALZARINI.pdf
- Basak, B. y Biswak, D. (2016). Potentiality of Indian rock phosphate as liming material in acid soil. *Geoderma*, 263(1), 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.016>
- Bedidi, A. (1992). Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. *Soil Science*, 153(2), 129-141.
- Benton, D. y Nabb, S. (2003). Carbohydrate, memory, and mood. *Nutrition Reviews*, 61(2), 61-67. <https://doi.org/10.1301/nr.2003.may.S61-S67>
- Bermúdez-Florez, L. N., Cartagena-Valenzuela, J. R. y Ramírez-Builes, V. H. (2018). Soil humidity and evapotranspiration under three coffee (*Coffea arabica* L.) planting densities at Naranjal experimental station (Chinchiná, Caldas, Colombia). *Acta Agronómica*, 67(3), 402-413. DOI:10.15446/acag.v67n3.67377
- Blanco, A. (2015). *Estudio de la distribución espacial y cartografía digital de algunas propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas de suelos de la Cuenca del Segura* [Tesis doctoral, Universidad de Murcia]. Repositorio institucional. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/46968>
- Bloom, P. (2000). *Soil pH and pH buffering*. Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton.

- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, N° 44, Instituto de Geografía
- Bonomo, V. y Rodríguez, F. (2020). Variabilidad espacial en la disponibilidad de forraje y algunas propiedades físico-químicas del suelo [Tesis de pregrado, Universidad de la República]. Repositorio institucional. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29005>
- Brady, N. y Weil, R. (1996). *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Brouder, S., Hofmann, B. y Reetz., H. (2001). Evaluating spatial variability of soil parameters for input management. *Better Crops*, 85(2), 8-11.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. y Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58,1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Camirra, H. y Cartaya, S. (2009). *Guía para la investigación académica: Una orientación metodológica diseñada para el postgrado-Iupma*. Instituto Universitari Pedagógico Monseñor Rafael Arias Blanco - Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- Carrillo, H. y Sánchez, D. (2024). *Implementación de un sistema de información geográfica con fines de manejo agronómico para la producción de café orgánico en Chirinos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/14405>
- Castellanos, J., Uvalle, J., y Aguilar, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Colección INCAPA.
- Castillo-Trejo, E. Y., Flota-Bañuelos, C., Alcudia-Pérez, J., Fraire-Cordero, S., Rosales-Martínez, V. y Quej-Chí, V. H. (2023). Macrofauna edáfica y calidad del suelo en agroecosistemas agrícolas y pecuarios de Campeche. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(3), 413-424. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3108>
- China, H. A. y Rodríguez, I. L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), 3-8. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1338>

- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavelle, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Megan, J., Wallenstein, M. D., Martin, J. A. y Bradford, M. A. (2011), Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17, 3392-3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>
- Conti, M. (2004). *Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo*. Universidad de Buenos Aires.
- Cox, M., Gerard, P. y Melinda, A. (2006). Selected soil properties variability and their relationships with yield in three Mississippi fields. *Soil Sci.* 171(1), 541-551. doi: 10.1097/01.ss.0000228031.49776.0f
- Cristóbal, A. D. (1996). Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo. *Agrociencias*, 30(3), 329-343.
- Cristobal, D., Álvarez, M., Hernández, E., Maldonado, R., Pérez, M. y Castro, R. (2018). Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra latinoamericana*, 26(4), 317-324. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000400004&lng=es&tlng=es.
- Déleg, X. (2018). Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis [Tesis de pregrado, Universidad de los Llanos]. Repositorio institucional. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/5d284218-ad79-4724-bace-6b0e851f07f0>
- Ding, C., Du, S., Ma, Y., Li, X., Zhang, T. y Wang, X. (2019). Changes in the pH of paddy soils after flooding and drainage: Modeling and validation. *Geoderma*, 337(1), 511-513. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.012
- Edward, J. P. (1997). *Soil science & management*. Delmar publishers. <https://archive.org/details/soilsciencemanag0000plas/page/n5/mode/2up>
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. IPNI. doi:10.13140/2.1.3888.9281
- ESRI (22 de julio de 2025a). Cómo funciona la interpolación de distancia inversa ponderada. ESRI. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.3/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>
- ESRI (22 de julio de 2025b). Vecindades de búsqueda 3D. ESRI. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.1/help/analysis/geostatistical-analyst/3d-search-neighborhoods.htm>

- ESRI (22 de julio de 2025c). Usar la validación cruzada para evaluar los resultados de interpolación. ESRI. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/performing-cross-validation-and-validation.htm>
- Fassbender, H. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3162>
- Food and Agriculture Organization - FAO. (2009). Los bosques y el agua. FAO. <https://www.fao.org/4/i0410s/i0410s00.pdf>
- Fortín, M. J., Dale, M. R., y Hoef, J. V. (2001). Spatial analysis in ecology. *Encyclopedia Environmetrics*, 4(1), 2051-2058.
- Galindo-Pacheco, J., Vargas-Díaz, R., Martínez-Niño, C. y Franco-Florez, C. (2024). Análisis de variación espacial de la fertilidad del suelo para la delimitación de zonas de manejo homogéneo en agricultura de precisión. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 5(2), 74-86. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v5i2.289>
- 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, 1-22. DOI: [dx.doi.org/10.14350/riig.54706](https://doi.org/10.14350/riig.54706)
- Gaston, L., Locke, M., Zablutowicz, R. y Reddy, K. (2001). Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi delta. *Soil Sci.*, 65(2), 449-459. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652449x>
- Geist, H. y Lambin, E. (2001). What drives tropical deforestation?: a meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. AGRIS. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB2013200077>
- Gonzales, S. 2015. *Distribución espacial por unidades fisiográficas, las propiedades físicas y químicas de los suelos con palma aceitera (Elaeis guineensis J.), Nueva Requena – Ucayali* [Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Universidad Nacional Agraria de la Selva. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/397>
- Gonzales, S. (2015). *Distribución espacial por unidades fisiográficas, las propiedades físicas y químicas de los suelos con - palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq), Nueva Requena.- Ucayali* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/397>

- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S. y Nelson, W. (1999). *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Prentice Hall
- Heil, D. y Sposito, G. (1997). Chemical attributes and processes affecting soil quality. In Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. *Developments in Soil Science*, 25(1), 59-79.
- Hernández, A., Lugo, L., Mora, A., Sánchez, J. y Arends, E. (2003). Variabilidad espacial edáfica en el sistema tradicional de conucos en el Amazonas de Venezuela. *Investigación Agraria. Sistemas Recursos Forestales*, 12(2), 43-54. ISSN 1131-7965
- Hernández, R. (2011). *Instrumentos de recolección de datos en ciencias sociales y ciencias biomédicas*. Createspace Independent Pub. https://www.academia.edu/37886946/Instrumentos_de_recoleccion_de_datos_en_ciencias_sociales_y_ciencias_biomedicas_Rafael_Hernandez_Nieto_pdf
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M.P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hernández, W., Marco, L. y Romero, P. (2018). Variabilidad espacial del pH y del contenido de Fe₂O₃ en suelos de la cuenca del río Tabure del estado Lara. *Revista Ciencia y Tecnología UTEQ*, 11(1), 19-27. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6550324>
- Ibarra, D., Ruiz, J. A., González, D. R., Flores, J. G. y Díaz, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura técnica en México*, 35(3), 267-276. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000300003&lng=es&tlng=es.
- Inocencio, E. (2022). Distribución espacial de indicadores de calidad fisicoquímica del suelo en el fundo “Cárdenas”, en nuevo progreso padre abad 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/e86e6fe5-1cee-4448-86b5-82d7d477b783>
- Instituto Geográfico del Perú, Lima-IGP. 2019. Tingo María. Clima. <http://www.met.igp.gob.pe/clima/HTML/tingomaria.html>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática- INEGI. (2002). Principales usos del suelo y tipos de vegetación por entidad federativa. <http://www.inegi.gob.mx>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales- INRENA. (1995). *Mapa ecológico del Perú*. Guía explicativa.

- International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) (2017). *IUFRO Annual Report 2017*. IUFRO. <https://www.iufro.org/publications/annual-report-2017>
- Jaramillo, D., Sadeghian, S., y Lince, L. (2012). *Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia. Informe de año sabático*. Universidad Nacional de Colombia, CENICAFÉ.
- Jiyan, X. y Webster, R. (1984). A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu county, China. *Catena*, 11(1), 13-26. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(84\)80002-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(84)80002-8)
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. y Lucas, N. (2001). *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. ESRI. http://downloads2.esri.com/support/documentation/ao_/Using_ArcGIS_Geostatistical_Analyst.pdf
- Jury, W., Gardner, W. y Gardner, W. (1991). *Soil physics*. John Wiley and Sons
- Kaluzny, S., Vega, S., Cardoso, T. y Shelly, A. (1998). *S+Spatial Stats. User's manual for Windows and Unix (Modern Acoustics and Signal)*. Springer Link. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7826-0>
- Kihui, E. (14 de setiembre de 2020). La preservación de los ecosistemas de pastizales en las economías en desarrollo. Global dev. <https://globaldev.blog/es/la-preservacion-de-los-ecosistemas-de-pastizales-en-las-economias-en-desarrollo/>
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1564-1571. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1564>
- Kummer, D. y Turner, B. (1994). The human causes of deforestation in Southeast Asia, *BioScience*, 44(5), 323–328. <https://doi.org/10.2307/1312382>
- Lebrenz, H. y Bárdossy, A. (2019). Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1633-1648, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019>
- Li, X., Yang, H., Zhang, C., Zeng, G., Liu, Y., Xu, W. y Lan, S. (2017). Spatial distribution and transport characteristics of heavy metals around an antimony mine area in central China. *Chemosphere*, 170, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.011>
- Liu, Z., Shao, M. y Wang, Y. (2013). Large-scale spatial interpolation of soil pH across the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 69, 2731–2741. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2095-z>

- López-Bonilla, J. L., Ponce-Rojas, Y., Vidal-Beltrán, S. y Zamudio-Castro, I. (2011). Aplicación del método de Krige para el análisis de cobertura de un nodo B. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 3(6), 16-31. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3659891.pdf>
- Lugo, D. (2007). Evaluación del riesgo agroambiental de los suelos de las comunidades indígenas del estado Anzoátegui, Venezuela. *Ecosistemas*, 16(1), 69-79.
- Medina, R. (2022). *Distribución y variabilidad espacial del pH y materia orgánica de los suelos de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México* [Tesis magistral, Instituto Tecnológico de Tlajomulco]. Repositorio Rinacional Tecnm. <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/4640>
- Melchiori, J., García, F. y Echeverría, H. (2000). Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo. I. Asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_variabilidad-espacial__1_.pdf
- Melodia, L. y Lenz, R. (2022). Persistent Homology as Stopping-Criterion for Voronoi Interpolation. *Computational Geometry*, 1 (1), 1-16. <https://arxiv.org/pdf/1911.02922>
- Meza, G. (2019). *Análisis de la distribución espacial de parámetros físico-químicos en el suelo aplicando SIG, Utcubamba, Amazonas, Perú* [Tesis pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1960>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. 2014. Guía para Muestreo de Suelos. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12104/07_guia-para-el-muestreo-de-suelos-final.pdf?v=1530548695
- Ministerio de desarrollo agrario y riego – MIDAGRI. (2022). Decreto Supremo N° 005-2022-midagri - Decreto supremo que aprueba el reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor. <https://dar.org.pe/wp-content/uploads/2022/04/2060758-1-1.pdf>
- Mongabay, (2009). El suelo del bosque. <https://global.mongabay.com/es/rainforests/0501.htm>
- Moreno, A. (2008). *Sistemas y análisis de la información geográfica: Manual de autoaprendizaje con ARC Gis*. Editorial RA-MA.
- Morgan K. 2019. Citrus soil pH management. *Askifas powered by EDIS*, 6, 1-2. <https://doi.org/10.32473/edis666-2020>.

- Mosquera, F. 2017. *Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en un suelo agrícola en el valle del Mantaro* [Tesis magistral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2923>
- Mulla, D. y Mcbratney, A. (2000). Soil spatial variability. Handbook of soil science. CRC Press.
- Muñoz, J., Martínez, L. y Giraldo, R. (2006). Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana* 24(2), 355-366. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200020&lng=en&tlng=es.
- Naik, R., Raju, A. y Rao, J. (2018). Assessment of soil fertility status in Paderu Mandal, Visakhapatnam district of Andhra Pradesh through Geospatial techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21(1), 73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.006>
- Nava-Pacheco, D., Landeta-Escamilla, D. O., Reyes-Benitez, M. A., Vallejo-Cantú, M. N. A., Alvarado-Lassman, D. A. y Rosas, D. E. S. (2022). Aplicación de hidrochar de residuos sólidos cítricos como mejorador de propiedades fisicoquímicas en suelos degradados. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 1(1), 236–244. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.191>
- Navarrete, M. y López, A. (2019). Importancia de los espacios comunes: una adaptación de la técnica de interpolación espacial Inverse Distance Weighted (IDW) en la predicción de datos socioeconómicos ausentes. En Moreno, T., Medina, M., López, N., Gazca, J. y Serrano, S. (Universidad Nacional Autónoma De México/UNAM), Colección: Regiones, desplazamientos y geopolítica. Agenda pública para el desarrollo territorial / Volumen III. Desigualdad socio-espacial, innovación tecnológica y procesos urbanos (pp. 49-64). Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. <https://ru.iiec.unam.mx/4646/>
- Navarro, E. (2017). *Influencia de la distribución de muestras sobre la variabilidad espacial de la biomasa de Setaria sphacelata (Schumach.)* [Tesis magistral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/2129>

- NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreo y análisis. secretaria de medio ambiente y recursos naturales. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., y Villagómez, A. (2014). Metodología de la investigación: cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. <https://universoabierto.org/2021/03/30/metodologia-de-la-investigacion-cuantitativa-cualitativa-y-redaccion-de-la-tesis/>
- Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Universitat de Girona y el Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció (SIGTE). https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Paredes, D. S. (2023). *Simulación geoespacial de los cambios de cobertura y uso de la tierra al año 2030 en la microcuenca Supte, distrito Rupa Rupa – Huánuco, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/cba3a8f5-9301-4d27-b2ee-869c63c40feb>
- Patel, R. y Pal, V. (2024). Spatial Distribution of Soil pH Status in Forest Soils of Telangana using GIS-Based Geo-Statistical Models. *National Academy Science Letters*. <https://doi.org/10.1007/s40009-024-01559-1>
- Paz, A., Fernández, M.J., Benito, E. y Castelao, A. (1996). Características físicas y mecánicas de los agregados del suelo bajo prado y cultivo. IV Congreso de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Lleida. Comunicaciones. Ediciones Universitat de Lleida. 13-18.
- PLA, I. (1990). La degradación y el desarrollo agrícola de Venezuela. *Agronomía Tropical*, 40(1), 7-27.
- Ponce, D., Pablos, P., Balmaseda, C., y Henríquez, M. (1999). Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en cuba. *Bioagro*, 11(1), 3-11.
- Porras, A. (2016). *Método Kriging de inferencia espacial*. Centro de Investigación en Geografía y Geomática. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/160>
- Prasad, R. y Power, J. (1997). Gestión de la fertilidad del suelo para la agricultura sostenible. Lewis Publishers.
- Qiu, J., Liu, F., Wang, D., Yan, K., Guo, J., Huang, W. y Feng, Y. (2024). Mapping key soil properties in low relief areas using integrated machine learning and geostatistics. *Ecological Indicators*, 171, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113228>

- Quincke, A. y Cuadro, R. (2019). *Fertilización de pasturas de leguminosas: resultados para el manejo del fósforo y el azufre*. Instituto Nacional de Investigación agropecuaria. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12408/1/st-248-2019.pdf>
- Quinteiro, M., Furtado, A., Schramm, M., Pinto, F., Viana, M. y Baligar, V. (2013). Aluminum effects on growth photosynthesis and mineral nutrition of cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 36(8), 1161-1179. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.766889>
- Rodríguez, H., y Rodríguez, J. (2002). *Métodos de análisis de suelos y plantas. Criterios de interpretación*. Trillas. D.F. México, México. ISBN: 978-607-17-0593-8.
- Ruiz-Álvarez, M., Gomariz-Castillo, F. y Alonso-Sarría, F. (2018). Análisis espacio-temporal de los cambios previstos en la evapotranspiración de referencia durante el siglo XXI en la Demarcación Hidrográfica del Segura (España) a partir de los modelos climáticos globales MPEH5 y MPEH5C. *Revista de geografía Norte Grande*, 71, 35-58. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300035>
- Saad, A. (2024). Spatial Analysis of Soil Chemical Properties (pH, EC, and CaCO₃%) Using the IDW Method at the Field Scale in Libyan Soil. *Sirte University Scientific Journal*, 14 (2), 49-56. <https://doi.org/10.37375/susj.v14i2.3089>
- Sauer, T. J. y Meek, D. W. (2003). Spatial variation of plant-available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(3), 826-836. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.8260>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. (2021). *Climas del Perú: Mapa de clasificación climática nacional*. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Shi, X., Xie, E., Zhao, Y., Li, H., Lu, F., Zhang, X. y Peng, Y. (2019). Spatio-temporal changes of cropland soil pH in a rapidly industrializing region in the Yangtze River Delta of China, 1980–2015. *Agriculture, ecosystems & environment*, 272(15), 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.015>
- Shi, Z., Wang, K., Bailey, S. J., Jordan, C. e Higgins, H. A. (2002). Temporal changes in the spatial distributions of some soil properties on a temperate grassland site. *Soil Use Manage*, 18(4), 353–362. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00252.x>
- Supo, J. 2020. *Taxonomía de la investigación: El arte de clasificar aplicado a la investigación científica*. Bioestadístico. https://www.youtube.com/watch?v=PbRPfwu1vS4&fbclid=IwAR2qAjvfG1jvBztVTz-fUzBWBGaIXnR7hCaQHjfsftjr5Mdfg1_-OX9Ym8, video, 22 feb. 2020.

- Tello, M. H. (2023). *Distribución espacial de la calidad del suelo en plantaciones de Coffea arabica (café) en el fundo “Domínguez” – Pueblo Libre – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/787a5124-1476-4a02-88cf-6efb4a9fcc7b>
- Vargas, R. E., Galindo, J. R., Giraldo, R., Varón, V. M., Wilches, W. A. y Franco, C. V. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, 10(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4118>
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y KRIGING en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43632109>
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. <https://doi.org/10.15517/rac.v32i1.6773>
- Waliszewski, S. e Infanzón, R. (2003). Diferencias en concentración de plaguicidas organoclorados persistentes en suelo, paja y granos de trigo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(1), 5-11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37019101>
- Wilding, L. 1985. *Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys*. Soil Spatial Variability Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSA
- Wit, J., Oldenbroek, H., Van Keulen, H. y Zwart, D. (1995). Criteria for sustainable livestock production: a proposal form implementation. *Agric. Ecosyst. Env.*, 53(3), 219-229. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00579-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00579-4)
- Wollenhaupt N.C., Wolkowski R. P. y Clayton M. K. (1994). Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *Journal of Production Agriculture*, 7(4), 441–447. <https://doi.org/10.2134/jpa1994.0441>
- Wu, C., Huang, J., Zhu, H., Zhang, L., Minasny, B., Marchant, B. P. y Mcbratney, A. B. (2019). Spatial changes in soil chemical properties in an agricultural zone in southeastern China due to land consolidation. *Soil and Tillage Research*, 187(1), 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.012>
- Zarazúa-Villaseñor, P., González-Eguiarte, D. R., Nuño-Romero, R., Ruiz-Corral, J. A. y Torres-Morán, J. P. (2007). Variabilidad espacial del pH del suelo en tres parcelas agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 25 (2), 203-210. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57325213.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Construcción de los semivariogramas de los tres sistemas de los suelos

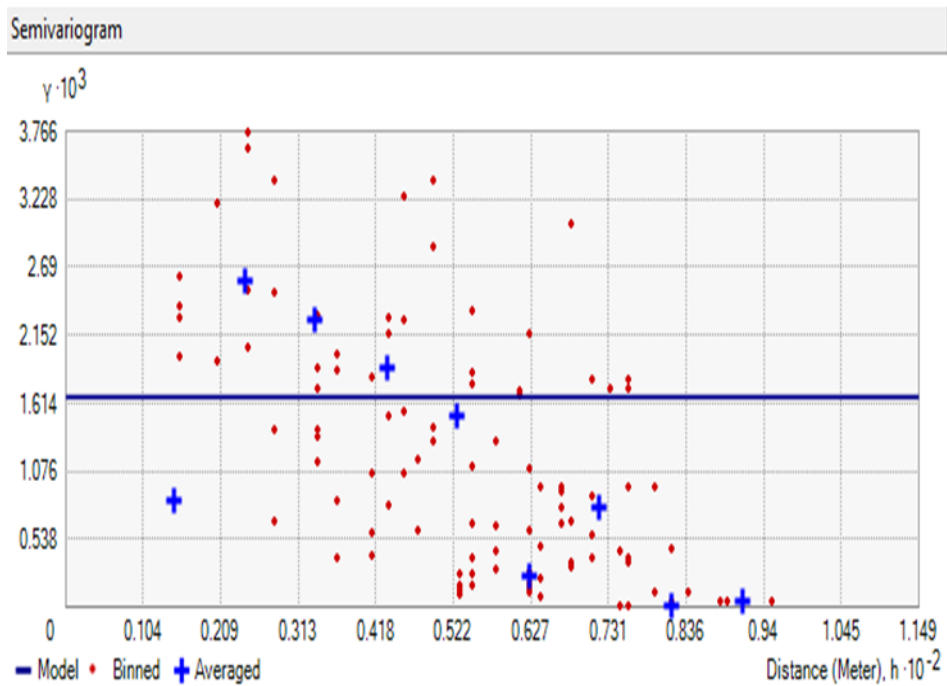


Figura 8. Semivariograma del pH inicial de la parcela naranjal

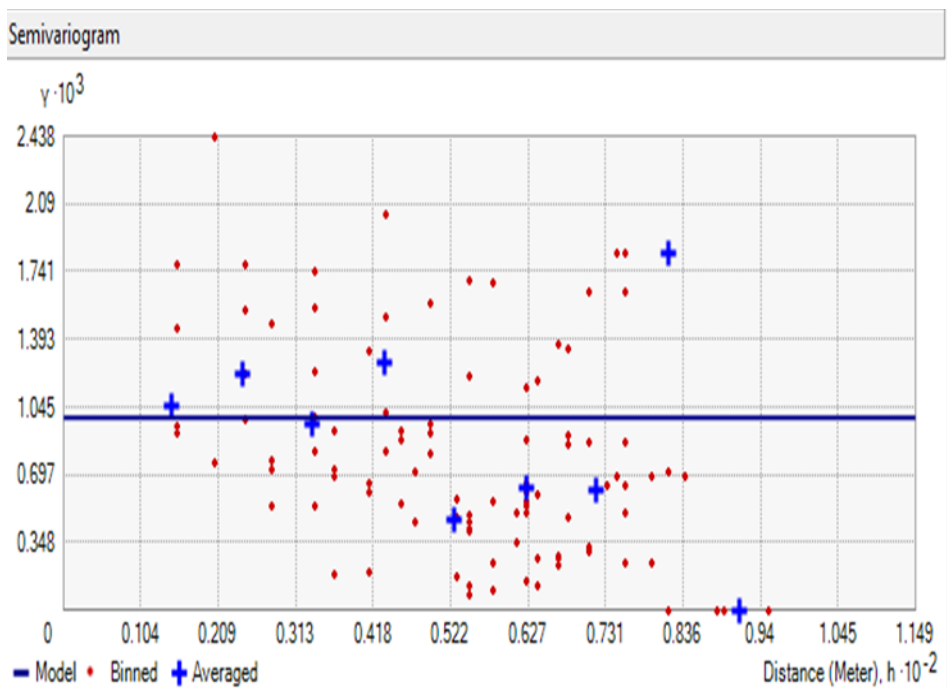


Figura 9. Semivariograma del pH final de la parcela naranjal

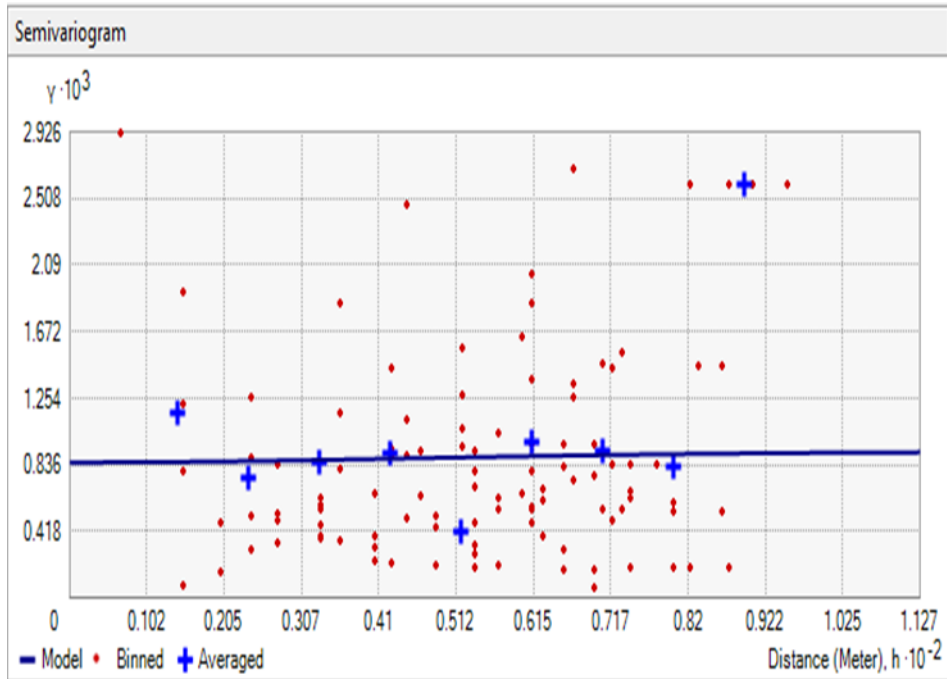


Figura 10. Semivariograma del pH inicial de la parcela pastizal

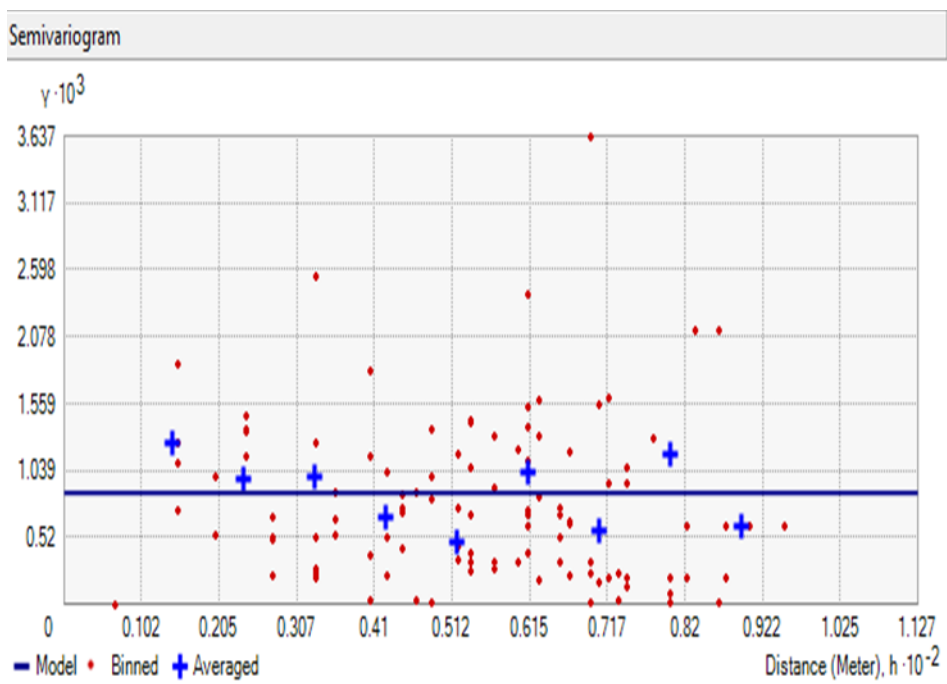


Figura 11. Semivariograma del pH final de la parcela pastizal

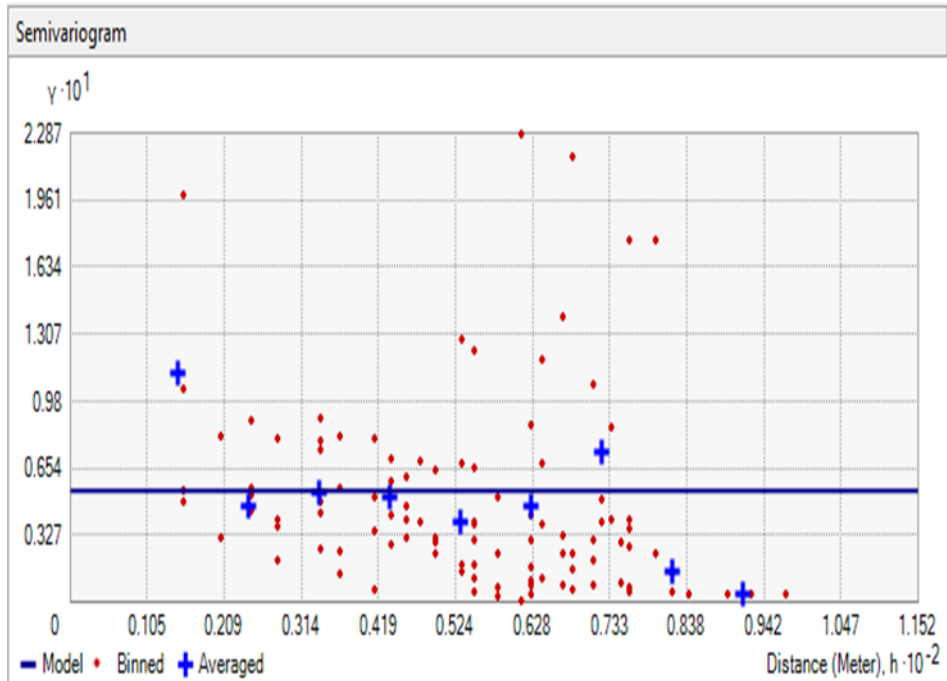


Figura 12. Semivariograma del pH inicial de la parcela bosque

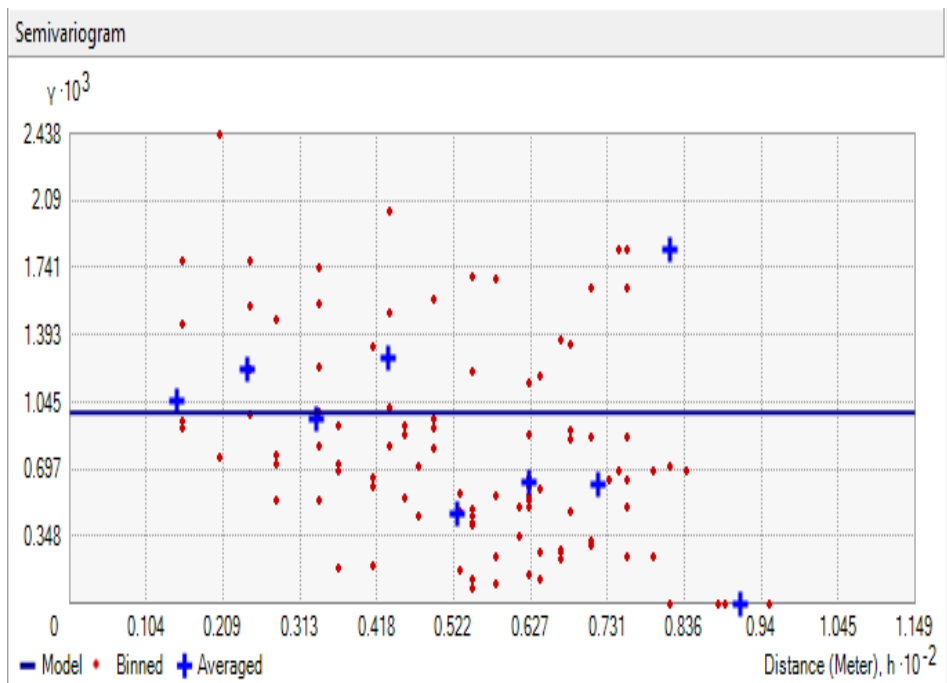
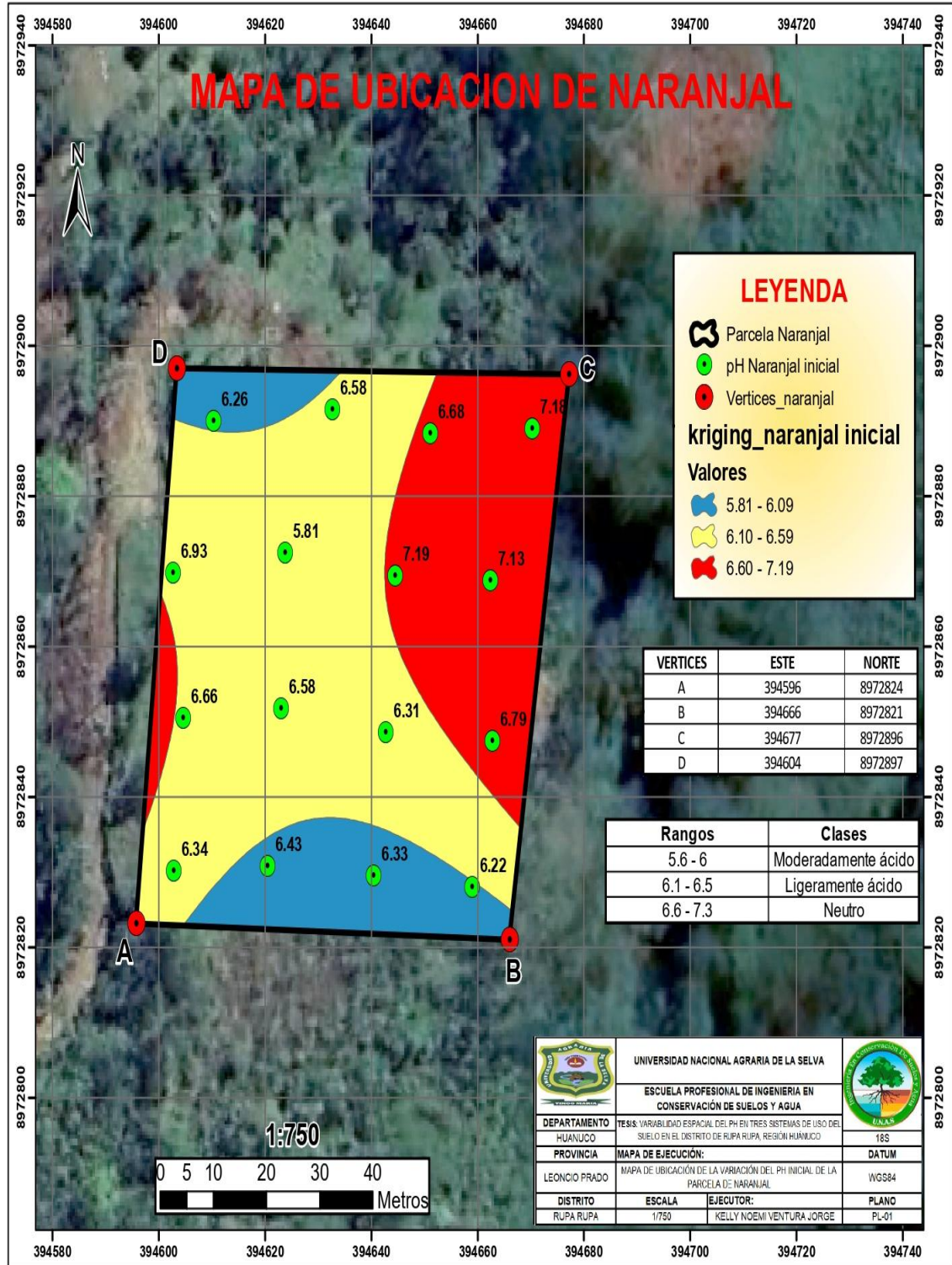


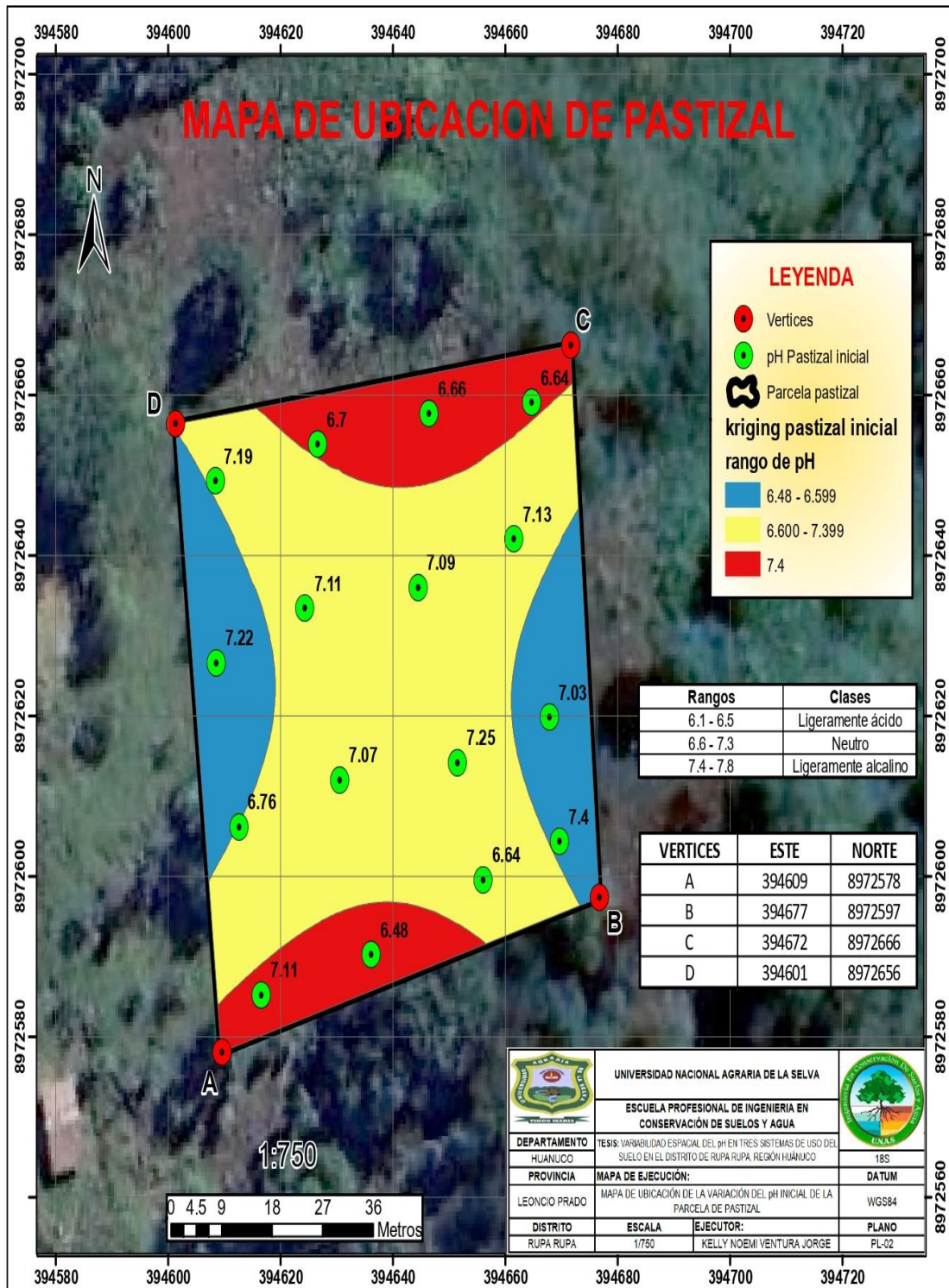
Figura 13. Semivariograma del pH final de la parcela bosque

Anexo 2. Mapa de variabilidad espacial de tres tipos de usos de suelo por la interpolación de Kriging e IDW

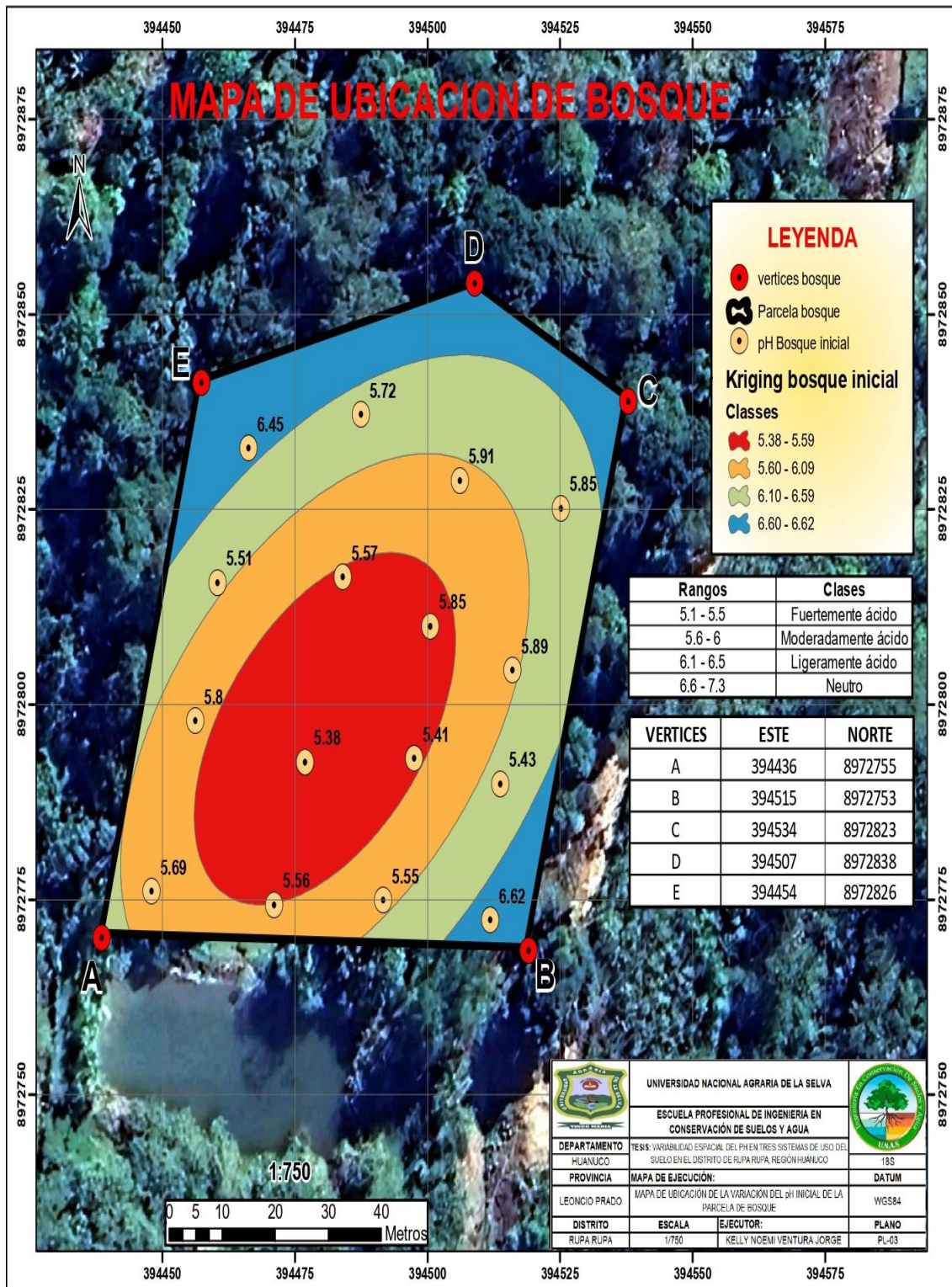
A. Mapa de variabilidad espacial del pH naranjal inicial por la interpolación de Kriging



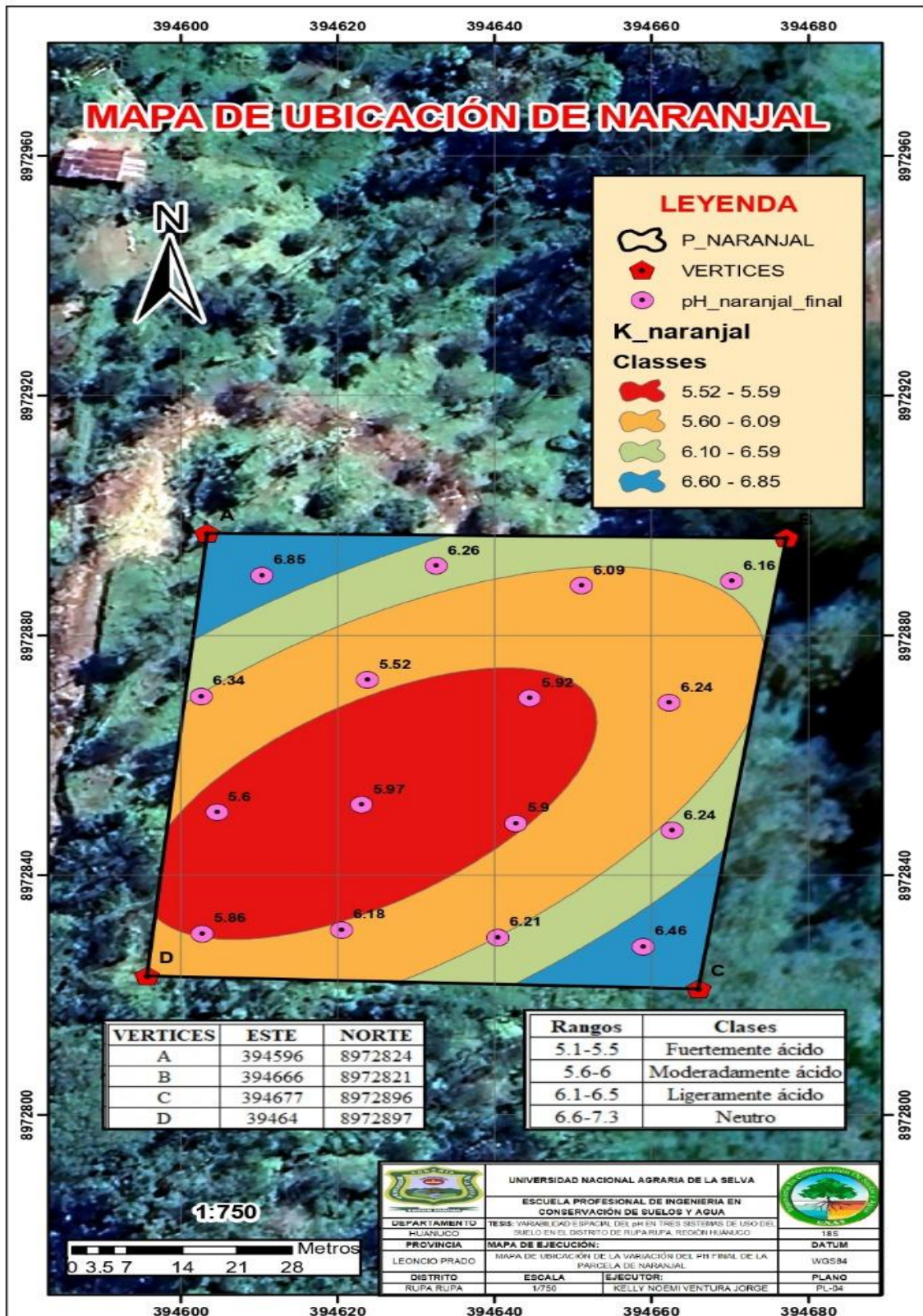
B. Mapa de variabilidad espacial del pH pastizal inicial por la interpolación de Kriging



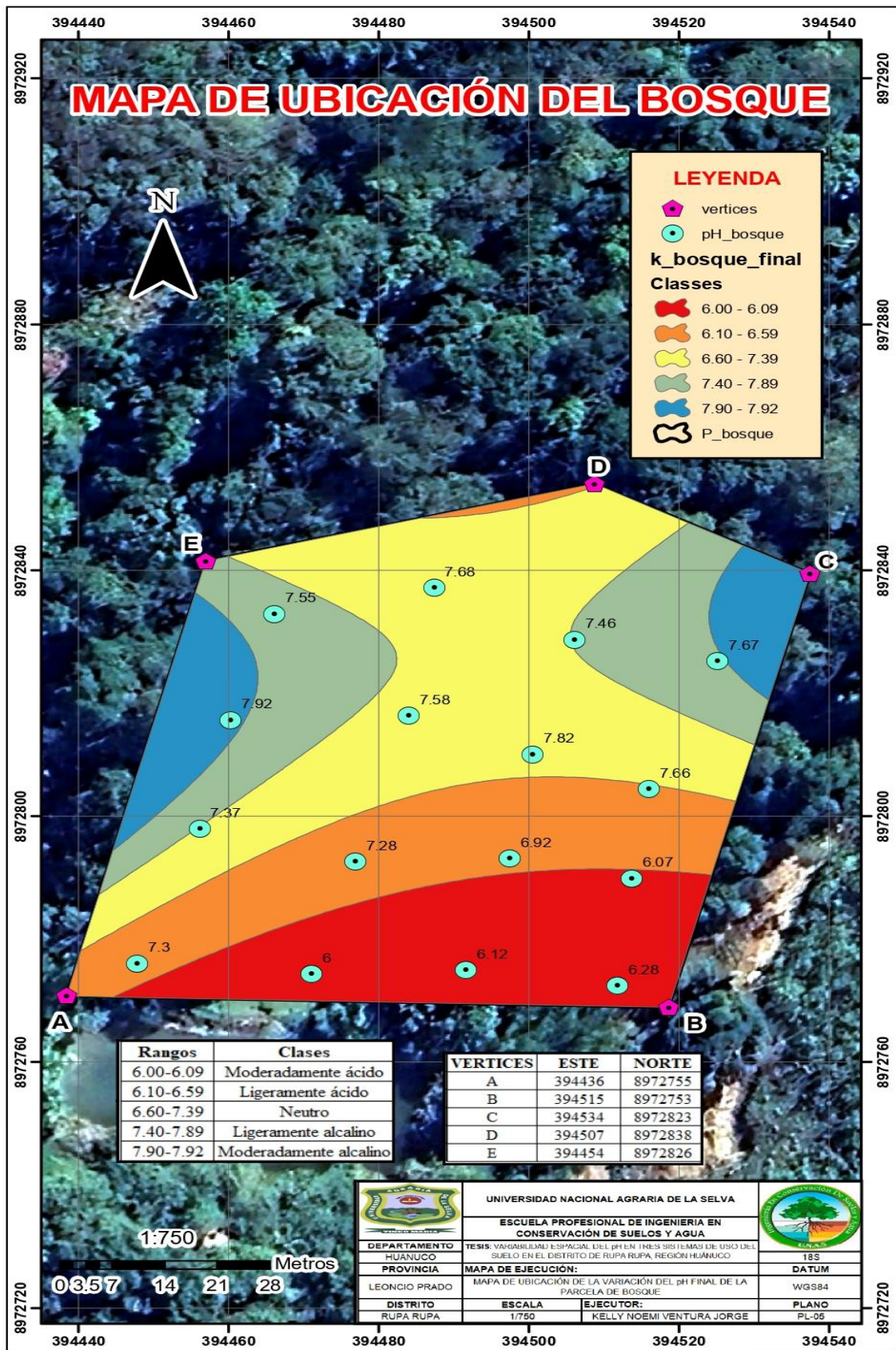
C. Mapa de variabilidad espacial del pH bosque inicial por la interpolación de Kriging



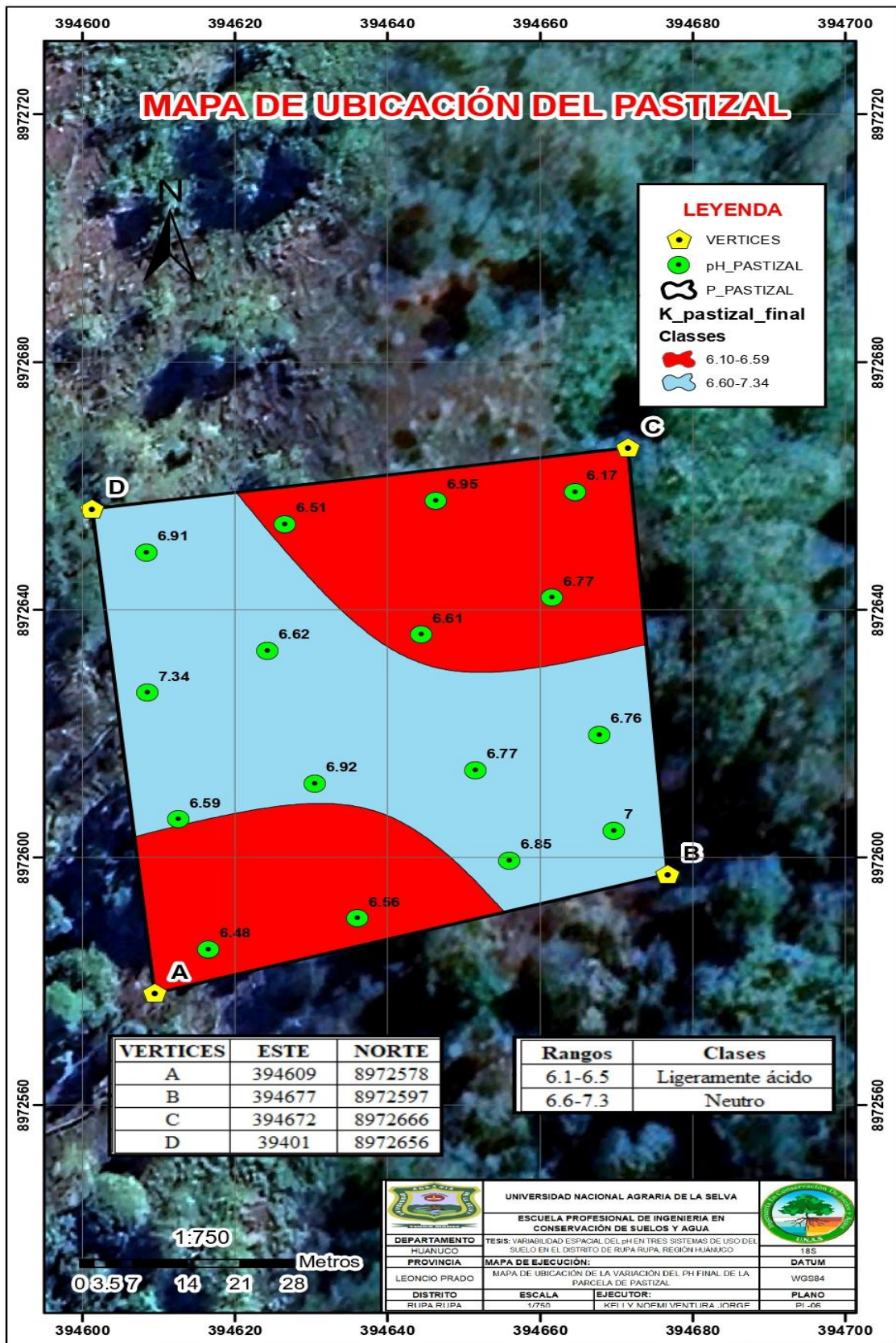
D. Mapa de variabilidad espacial del pH naranjal final por la interpolación de Kriging



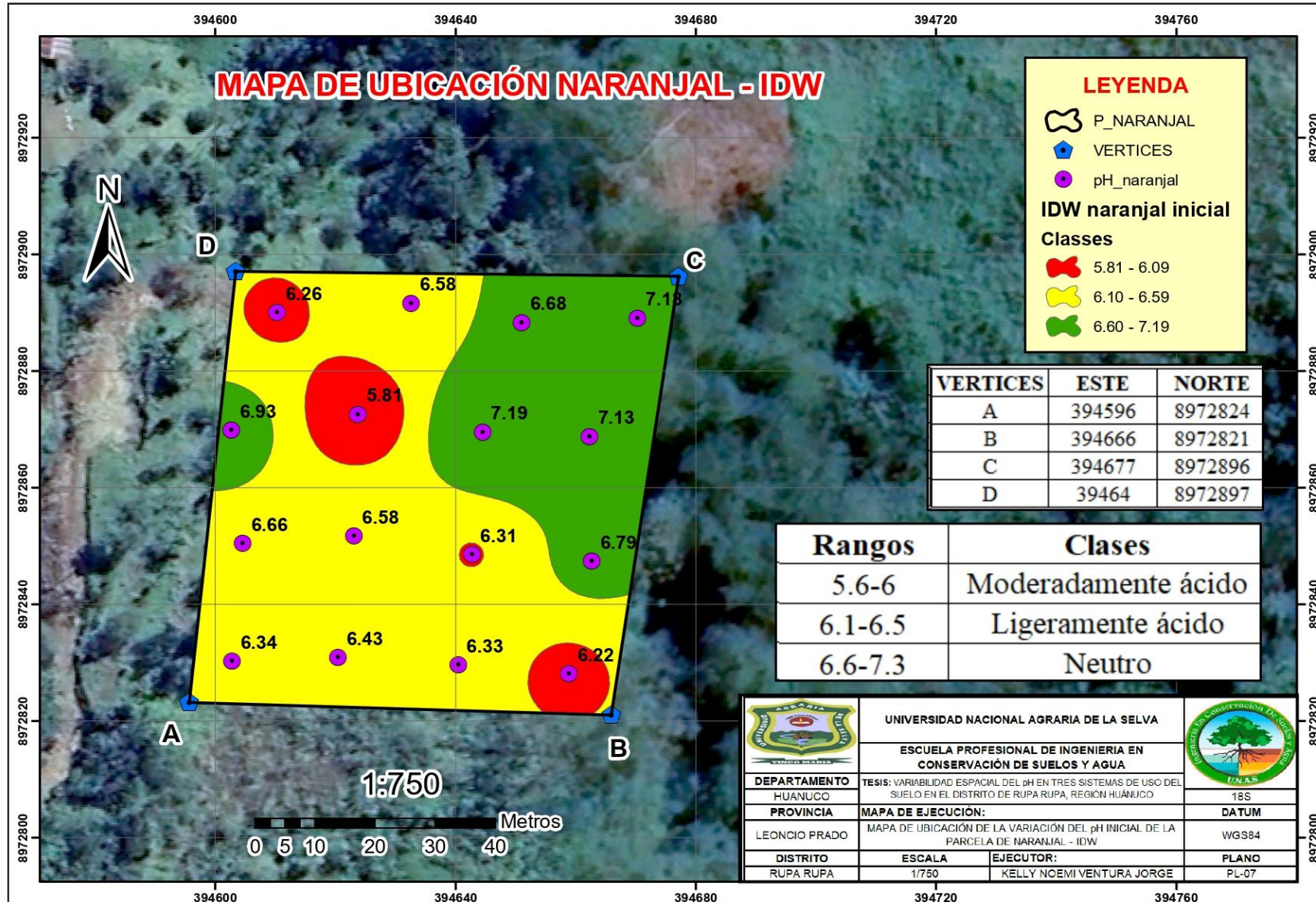
E. Mapa de variabilidad espacial del pH de bosque final por la interpolación de Kriging



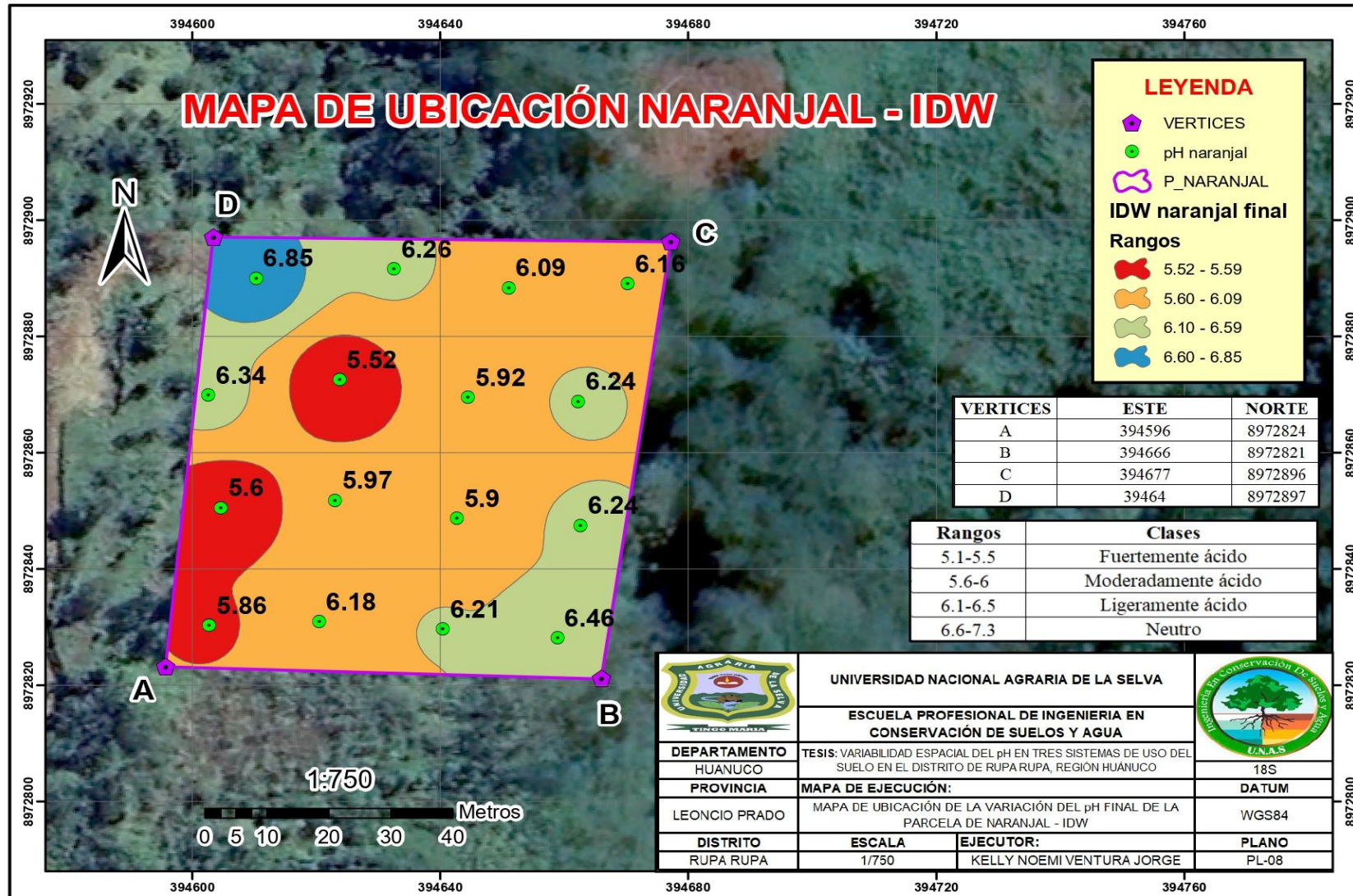
F. Mapa de variabilidad espacial del pH pastizal final por la interpolación de Kriging



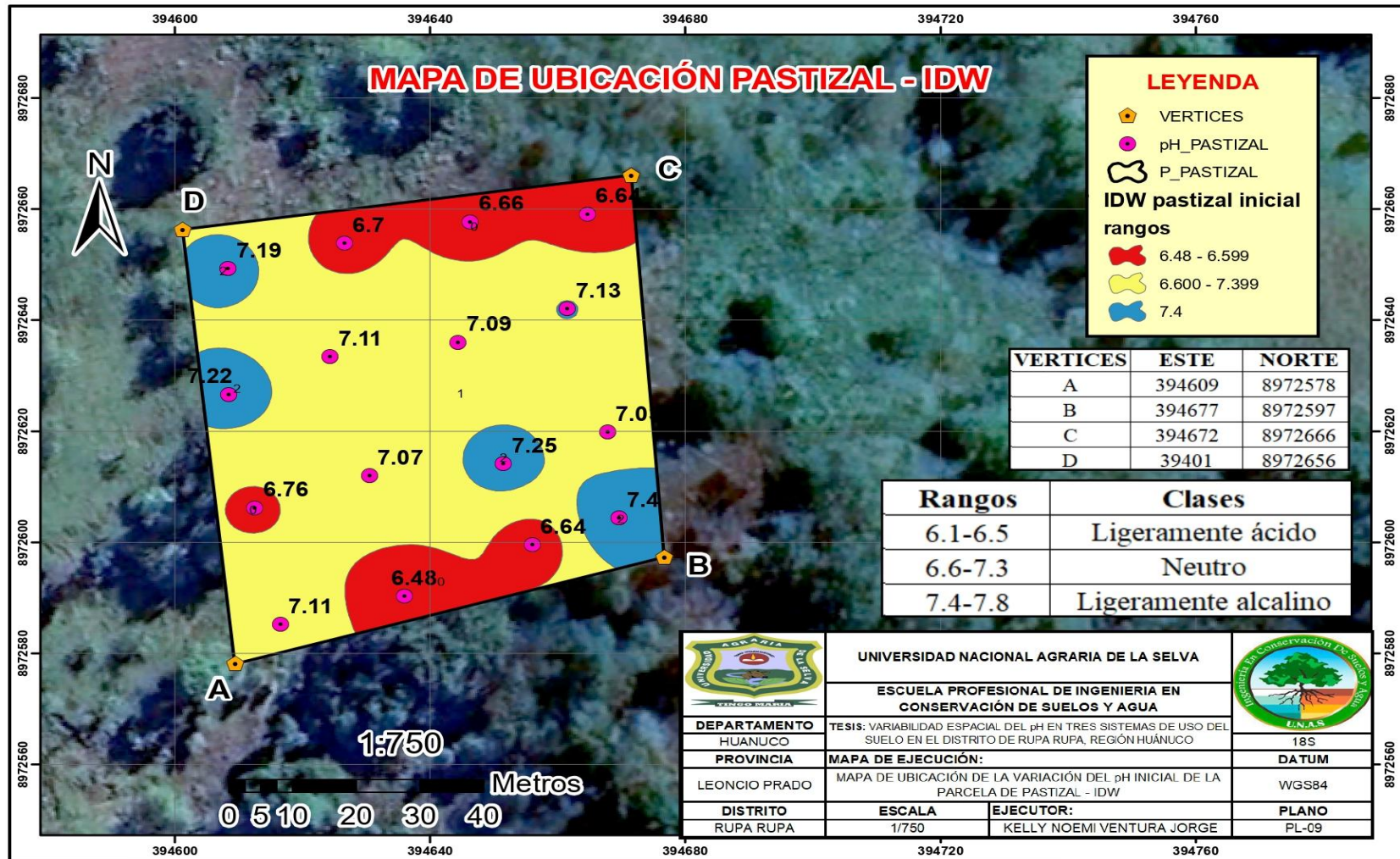
G. Mapa de variabilidad espacial del pH naranjal inicial por la interpolación de IDW



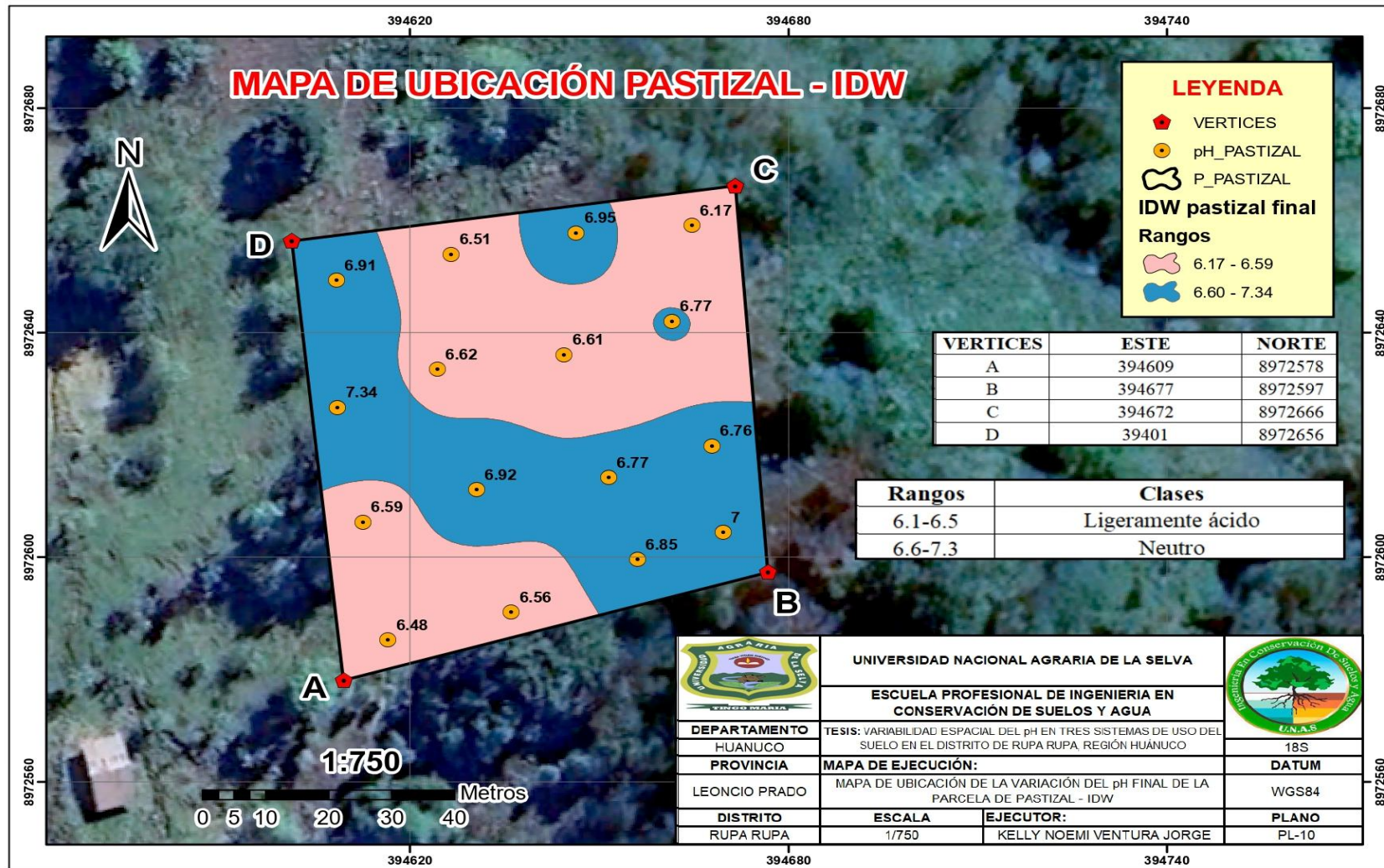
H. Mapa de variabilidad espacial del pH naranjal final por la interpolación de IDW



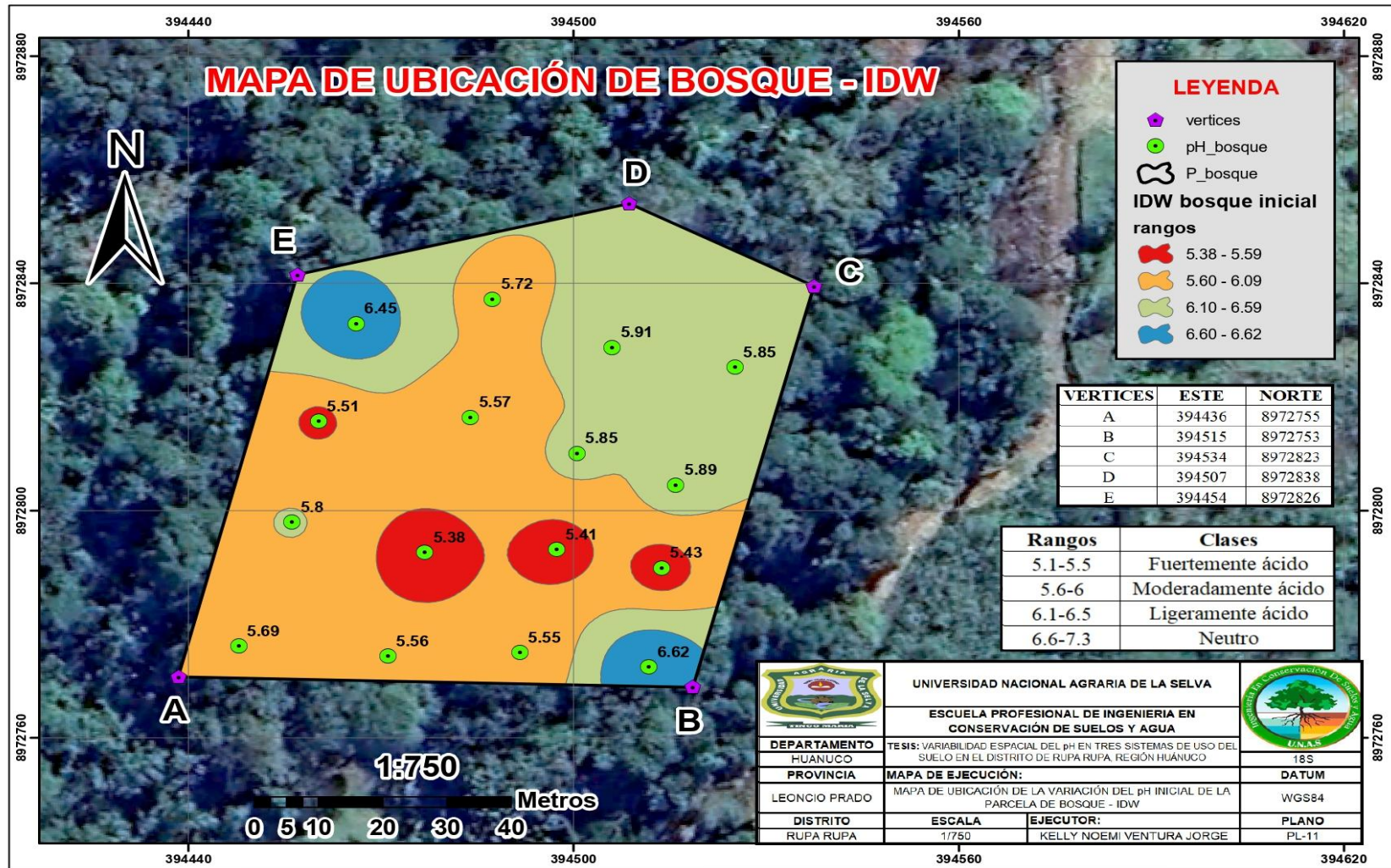
I. Mapa de variabilidad espacial del pH pastizal inicial por la interpolación de IDW



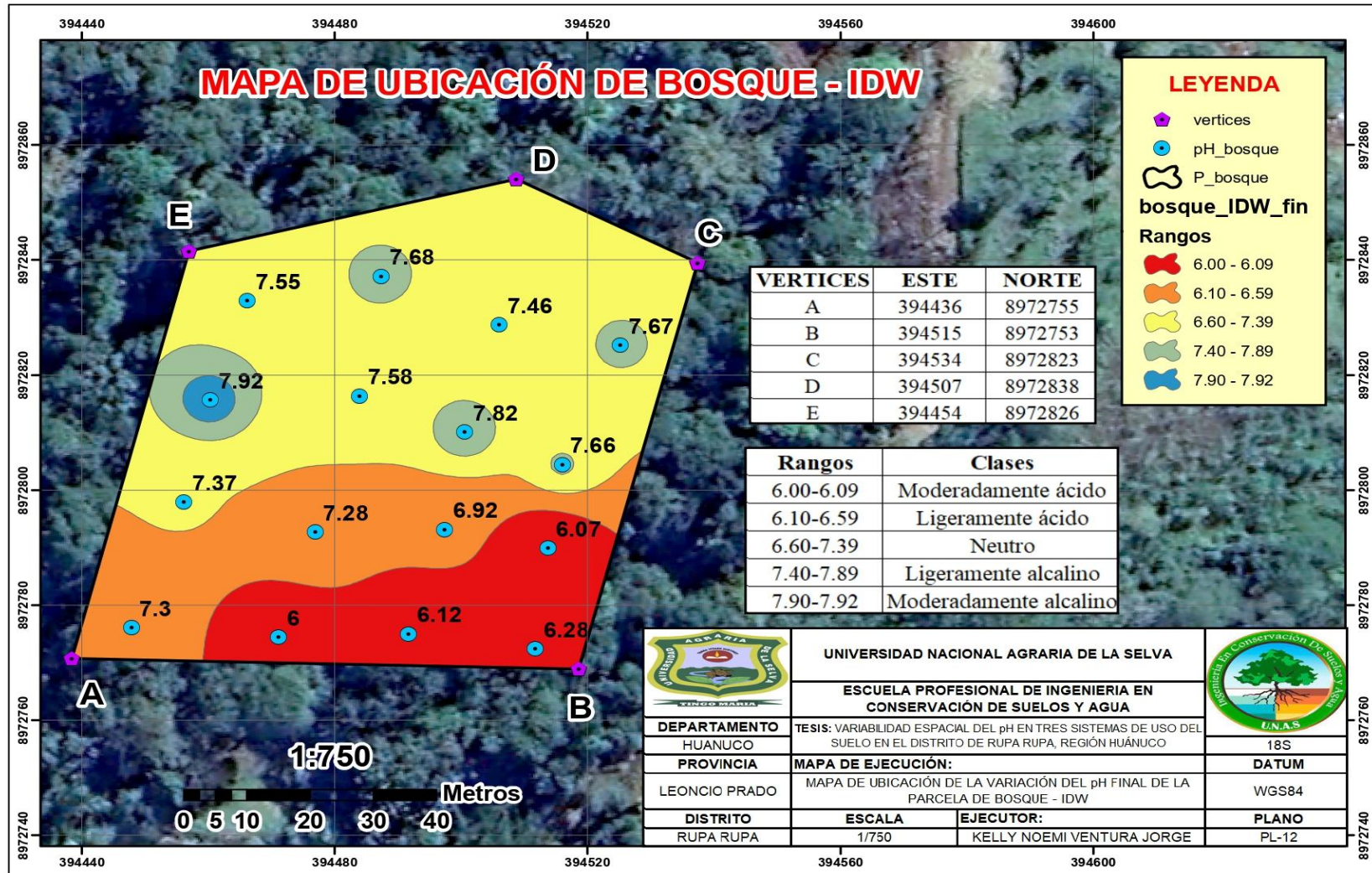
J. Mapa de variabilidad espacial del pH pastizal final por la interpolación de IDW



K. Mapa de variabilidad espacial del pH bosque inicial por la interpolación de IDW



L. Mapa de variabilidad espacial del pH bosque final por la interpolación de IDW



Anexo 3. Panel fotográfico



Figura 14. Delimitación y demarcación de las parcelas y muestras de estudio



Figura 15. Extracción y geoposicionamiento de las muestras de estudio



Figura 16. Extracción y separación de las muestras de estudio



Figura 17. Secado de las muestras extraídas de los tres sistemas de uso de suelos



Figura 18. Colección y rotulado de las muestras de suelos de estudio



Figura 19. Tamizado de las muestras de estudio



Figura 20. Pesaje de las muestras para el análisis del pH



Figura 21. Medición del pH en los suelos de estudio con el peachímetro digital

Anexo 4. Análisis químico del pH en los suelos

A. Análisis inicial del pH en los suelos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANALISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:	KELLY NOEMI VENTURA JORGE	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	9/12/2022
PROVINCIA:	LEONCIO PRADO	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	9/12/2022
DISTRITO:	RUPA RUPA	FECHA DE REPORTE:	15/12/2022
LOCALIDAD:	SUPTA SAN JORGE	OBSERVACION:	-----

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS		pH
	CODIGO DEL LAB.	REFERENCIA	1:1
1	S1900-1	P-1	7.03
2	S1900-2	P-2	7.25
3	S1900-3	P-3	7.07
4	S1900-4	P-4	6.76
5	S1900-5	P-5	7.22
6	S1900-6	P-6	7.11
7	S1900-7	P-7	7.09
8	S1900-8	P-8	7.13
9	S1900-9	P-9	7.19
10	S1900-10	P-10	6.70
11	S1900-11	P-11	6.66
12	S1900-12	P-12	6.64
13	S1900-13	P-13	7.11
14	S1900-14	P-14	6.48
15	S1900-15	P-15	6.64
16	S1900-16	P-16	7.40
17	S1900-17	N-1	6.22
18	S1900-18	N-2	6.33
19	S1900-19	N-3	6.43
20	S1900-20	N-4	6.34
21	S1900-21	N-5	6.66
22	S1900-22	N-6	6.58
23	S1900-23	N-7	6.31
24	S1900-24	N-8	6.79
25	S1900-25	N-9	6.93
26	S1900-26	N-10	5.81
27	S1900-27	N-11	7.19
28	S1900-28	N-12	7.13
29	S1900-29	N-13	6.26
30	S1900-30	N-14	6.58
31	S1900-31	N-15	6.68
32	S1900-32	N-16	7.18
33	S1900-33	B-1	6.62
34	S1900-34	B-2	5.55
35	S1900-35	B-3	5.56
36	S1900-36	B-4	5.69
37	S1900-37	B-5	5.43
38	S1900-38	B-6	5.41
39	S1900-39	B-7	5.38
40	S1900-40	B-8	5.80
41	S1900-41	B-9	5.89
42	S1900-42	B-10	5.85
43	S1900-43	B-11	5.57
44	S1900-44	B-12	5.51
45	S1900-45	B-13	5.85
46	S1900-46	B-14	5.91
47	S1900-47	B-15	5.72
48	S1900-48	B-16	6.45

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María


Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología




Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

B. Análisis final del pH en los suelos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANÁLISIS DE SUELOS




1. DATOS


SOLICITANTE:	KELLY NOEMI VENTURA JORGE	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	28/09/2023
PROVINCIA:	LEONCIO PRADO	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	28/09/2023
DISTRITO:	RUPA RUPA	FECHA DE REPORTE:	10/10/2023
LOCALIDAD:	SUPTA SAN JORGE	RECIBO O FACTURA:	23808
CULTIVO:	----	OBSERVACION:	----

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS		pH
	CODIGO DEL LAB.	REFERENCIA	1:1
1	S1299-1	P-1	6.76
2	S1299-2	P-2	6.77
3	S1299-3	P-3	6.92
4	S1299-4	P-4	6.59
5	S1299-5	P-5	7.34
6	S1299-6	P-6	6.62
7	S1299-7	P-7	6.61
8	S1299-8	P-8	6.77
9	S1299-9	P-9	6.91
10	S1299-10	P-10	6.51
11	S1299-11	P-11	6.95
12	S1299-12	P-12	6.17
13	S1299-13	P-13	6.48
14	S1299-14	P-14	6.56
15	S1299-15	P-15	6.85
16	S1299-16	P-16	7.00
17	S1299-17	N-1	6.46
18	S1299-18	N-2	6.21
19	S1299-19	N-3	6.18
20	S1299-20	N-4	5.86
21	S1299-21	N-5	5.60
22	S1299-22	N-6	5.97
23	S1299-23	N-7	5.90
24	S1299-24	N-8	6.24
25	S1299-25	N-9	6.34
26	S1299-26	N-10	5.52
27	S1299-27	N-11	5.92
28	S1299-28	N-12	6.24
29	S1299-29	N-13	6.85
30	S1299-30	N-14	6.26
31	S1299-31	N-15	6.09
32	S1299-32	N-16	6.16
33	S1299-33	B-1	6.28
34	S1299-34	B-2	6.12
35	S1299-35	B-3	6.00
36	S1299-36	B-4	7.30
37	S1299-37	B-5	6.07
38	S1299-38	B-6	6.92
39	S1299-39	B-7	7.28
40	S1299-40	B-8	7.37
41	S1299-41	B-9	7.66
42	S1299-42	B-10	7.82
43	S1299-43	B-11	7.58
44	S1299-44	B-12	7.92
45	S1299-45	B-13	7.67
46	S1299-46	B-14	7.46
47	S1299-47	B-15	7.68
48	S1299-48	B-16	7.55



Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



ING. LUIS GERMAN MANSILLA MINAYA
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Anexo 5. Datos climatológicos de la estación de Tingo María



DATOS CLIMATOLÓGICOS DE LA ESTACIÓN PRINCIPAL DE TINGO MARÍA (CP)

UBICACIÓN: POLITICA - Región. : HUÁNUCO Prov. : LEONCIO PRADO Dist. : RUPA RUPA

GEOGRÁFICA: Lat. : 9° 18' 36.6" S. Long. : 76° 0' 1.8" W. Alt. : 657 msnm.

REGISTRO MENSUAL DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS - PERIODO: DICIEMBRE 2022 & SETIEMBRE - 2023

MESES	TEMPERATURA DEL AIRE (°C)			HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)	PRECIPITACIÓN (mm).
	Máxima	Minima	Media		
DICIEMBRE	30.06	20.62	25.34	82.79	227.10
ENERO	29.26	20.62	24.94	85.55	373.50
FEBRERO	30.15	20.75	25.45	84.33	344.10
MARZO	29.84	21.07	25.46	84.85	297.10
ABRIL	31.02	20.67	25.85	82.33	180.90
MAYO	30.92	21.22	26.07	84.05	158.50
JUNIO	30.48	20.30	25.39	82.04	214.40
JULIO	31.66	20.43	26.05	80.48	64.80
AGOSTO	32.67	20.43	26.55	78.48	76.90
SEPTIEMBRE	32.77	20.93	26.85	77.55	138.90

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
GABINETE DE METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

Ing. M.Sc. Erle Bustamante Scaglioni
JEFE DEL GABINETE
METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA