

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



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y SU
RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN EL DISTRITO DE
LUYANDO

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

Bach. TORRES GOMEZ ERICK DANIEL

Tingo María – Perú.

2024



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°010-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 12 de enero de 2024, a horas 09:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN EL DISTRITO DE LUYANDO”

Presentado por el Bachiller: **TORRES GOMEZ, ERICK DANIEL**, 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 CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 24 de enero de 2024


Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
PRESIDENTE


Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
MIEMBRO


Ing. M. Sc. MARCO A. DUEÑAS TUESTA
MIEMBRO




Dr. NELINO FLORIDA ROFNER
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 041 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación 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:

Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN EL DISTRITO DE LUYANDO	TORRES GOMEZ ERICK DANIEL	17 % Diecisiete

Tingo María, 05 de febrero de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

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



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y SU
RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN EL DISTRITO DE
LUYANDO

Autor	: Bach. Erick Daniel, Torres Gomez
Asesor de Tesis	: Dr. Nelino Florida Rofner
Programa de investigación	: Gestión de Cuencas Hidrográficas
Línea de investigación	: Gestión y Conservación del Recurso Suelo
Eje Temático de Investigación	: Estudios edafológicos
Lugar de Ejecución	: Luyando
Duración	: Seis meses
Financiamiento	: S/. 4,724.00
Propio	: Si
FEDU	: No
Otros	: No

Tingo María – Perú, 2023



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE
Y TESIS TA**

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos generales

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad : FRNR-EPG-UNAS
Título de la tesis : Distribución espacial de la conductividad hidráulica y su relación con las propiedades físicas del suelo en el distrito de Luyando.
Objetivo general : Determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica y su relación con las propiedades físicas del suelo en el distrito de Luyando.
Autor : Bach. Torres Gomez, Erick Daniel
Asesor (es) : Dr. Florida Rofner, Nelino
Programa de investigación : Gestión de cuencas hidrográficas
Línea de investigación : Gestión y conservación del Recurso Suelo
Eje temático : Estudios edafológicos
Lugar de ejecución : Luyando
Duración : Fecha de inicio : Enero 2023
: Fecha de término : Junio 2023
Financiamiento : FEDU : S/. 0,00
: Propio : S/. 4 724,00
: Otros : S/. 0,00

Tingo María, Perú, enero 2023.

.....
Bach. Erick Daniel Torres Gomez
Tesis ta

.....
Dr. Nelino, Florida Rofner
Asesor

DEDICATORIA

Con gratitud y humildad a Dios, fuente de sabiduría infinita y guía constante en mi trayecto académico. Su luz iluminó cada paso de este camino, inspirando discernimiento y fortaleza. A Él ofrezco este logro como testimonio de mi fe y reconocimiento por su inagotable amor y orientación.

A mis amados padres, Jorge y Elvira, siendo los pilares fundamentales que con su apoyo, paciencia, comprensión e incondicional amor inculcaron valores, cualidades y caracteres, haciendo de mí la persona que soy. No lo habría logrado sin ustedes, este logro es nuestro y se los dedico con todo el amor que puedo sentir.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi alma mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme la oportunidad de embarcarme en esta enriquecedora travesía académica. A lo largo de mi carrera, he sido nutrido por un entorno que fomenta el aprendizaje, la excelencia y la exploración intelectual.

Agradezco a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. A mi asesor, Dr. Nelino Florida Rofner, por su orientación experta y paciencia constante; a mis profesores, por compartir su conocimiento y estimular mi pensamiento crítico; a mis amigos y familia, por su apoyo inquebrantable y aliento constante.

A un gran amigo, el Sr. Luis Tello (QEPD). Sus pequeñas acciones impactaron grandemente en mi vida.

A mis amigos con los cuales compartí experiencias inolvidables: Stefany Peña Ramos, Jherson Salcedo Machuca, José Luis Inga Platino y Cristian Alania Aquino.

Al Ingeniero Ricardo Martín Chávez Asencio, Cristian Paolo Alomía León y al Laboratorio de Recursos Hídricos.

Cada conversación, sugerencia y gesto amable han dejado una marca indeleble en este trabajo. Agradezco a todos los que formaron parte de este viaje académico, brindándome su valioso tiempo y esfuerzo.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Propiedades físicas del suelo.....	3
2.1.1. Conductividad hidráulica (K).....	3
2.1.2. Textura.....	4
2.1.3. Porosidad.....	5
2.1.4. Densidad aparente.....	6
2.1.5. Densidad real.....	7
2.1.6. Resistencia mecánica a la penetración.....	7
2.2. Sistema de Información Geográfica.....	8
2.3. Geoestadística.....	8
2.3.1. Variable regionalizada.....	9
2.4. Correlación espacial.....	9
2.4.1. Índice de Morán.....	9
2.4.2. Semivarianza.....	10
2.4.3. Semivariograma.....	10
2.4.4. Modelos de semivariograma.....	12
2.5. Predicción espacial.....	13
2.5.1. Distribución espacial.....	13
2.5.2. Método Kriging.....	14
2.6. Estado de arte.....	15
2.6.1. Antecedentes nacionales e internacionales.....	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. Lugar de ejecución.....	17
3.1.1. Clima.....	17
3.2. Materiales y equipos.....	18
3.2.1. Materiales de campo.....	18
3.2.2. Materiales de laboratorio.....	18
3.2.3. Equipos de campo.....	18
3.2.4. Equipos de laboratorio.....	18

3.2.5. Software.....	18
3.3. Metodología	18
3.3.1. Población y muestra	18
3.3.2. Determinación de las variables en estudio.....	20
3.3.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica.....	20
3.3.2.2. Determinación de las propiedades físicas del suelo	21
3.3.2.3. Prueba de normalidad.....	22
3.3.2.4. Autocorrelación espacial	22
3.3.2.5. Distribución espacial	22
3.3.2.6. Correlación de Pearson.....	22
4.1. Propiedades físicas del suelo	23
4.1.1. Estadísticos descriptivos.....	23
4.2. Correlación espacial.....	25
4.2.1. Análisis de tendencias	25
4.2.2. Índice de Morán	27
4.3. Distribución espacial con KO	29
4.3.1. Parámetros de los modelos geoestadísticos de mejor ajuste.....	29
4.3.2. Distribución espacial de la conductividad hidráulica.....	31
4.3.3. Distribución espacial de las propiedades físicas del suelo	32
4.3.3.1. Distribución espacial de los niveles de arena	32
4.3.3.2. Distribución espacial de los niveles de limo	33
4.3.3.3. Distribución espacial de la resistencia mecánica a la penetración.....	34
4.4. Correlación de Pearson.....	35
V. CONCLUSIONES	37
VI. PROPUESTAS A FUTURO	38
VII. REFERENCIAS	39
ANEXOS	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Clasificación de la conductividad hidráulica	3
2. Descripción de las partículas minerales del suelo	4
3. Clasificación de poros del suelo	5
4. Cualificación de la porosidad	6
5. Cualificación de la densidad aparente	7
6. Densidad real para los horizontes del suelo	7
7. Parámetros y métodos de determinación	22
8. Análisis de tendencia	25
9. Análisis geoestadístico	29
10. Coeficientes de correlación de Pearson	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Triángulo textural	5
2. Parámetros básicos del semivariograma	12
3. Modelos de semivariograma	13
4. Ubicación geográfica del área de estudio	17
5. Distribución de los puntos de muestreo sobre la fisiografía de Luyando	19
6. Procedimiento de extracción de muestras.....	20
7. Dispositivo sensor del nivel de agua	21
8. Gráficos de tendencia. A, conductividad hidráulica; B, arena; C, limo; D, arcilla; E, densidad aparente; F, densidad real; G, porosidad y H, resistencia mecánica a la penetración.....	27
9. Test del Índice de Morán	28
10. Semivariogramas. A, conductividad hidráulica; B, arena; C, limo; D, arcilla E, densidad aparente; F, densidad real; G, porosidad; H, resistencia mecánica a la penetración	31
11. Distribución espacial de la conductividad hidráulica (K).....	32
12. Distribución espacial del contenido de arena.....	33
13. Distribución espacial del contenido de limo	34
14. Distribución espacial de la RP	35
15. Georreferenciación de los puntos de muestreo	43
16. Recolección de muestras para densidad aparente.....	43
17. Recolección de muestras para conductividad hidráulica	44
18. Pesado de muestras.....	44
19. Preparación de muestras para conductividad hidráulica.....	45
20. Tamizado de las muestras	45
21. Gráficos descriptivos de la conductividad hidráulica.....	46
22. Gráficos descriptivos del contenido de arena.....	46
23. Gráficos descriptivos del contenido de limo	47
24. Gráficos descriptivos del contenido de arcilla	47
25. Gráficos descriptivos de la densidad aparente	48
26. Gráficos descriptivos de la densidad real.....	48
27. Gráficos descriptivos de la porosidad del suelo	49
28. Gráficos descriptivos de la resistencia mecánica a la penetración del suelo	49
29. Código de compilación I de Morán	50

RESUMEN

La investigación evaluó la distribución espacial de la conductividad hidráulica y su relación con las propiedades físicas del suelo en el distrito de Luyando. Metodológicamente la investigación es una investigación no experimental, descriptiva-transversal en donde se evaluó la conductividad hidráulica (K) y los indicadores físicos: textura, densidad aparente (DA), densidad real (DR), porosidad (PT), resistencia mecánica a la penetración (RP) y se realizó la distribución espacial de la K utilizando Kriging Ordinario (KO) y su relación con los indicadores físicos a través de la correlación de Pearson. Los resultados mostraron que la variabilidad de la K es muy alta, moderadamente alta para RP, moderada para el contenido de arena, moderadamente bajo para el contenido de limo y arcilla, bajos para la DA, DR y PT. Los semivariogramas de la distribución espacial revelaron que los ajustes más óptimos se obtuvieron utilizando modelos Gaussianos, exponenciales, esféricos y circulares para las variables K, arena, limo y RP, respectivamente. Estas variables exhibieron una dependencia espacial moderada, caracterizada por rangos relativamente altos, mientras que la DA, DR, PT y arcilla presentaron un efecto pepita puro (EPP) o independencia espacial. En conclusión, la distribución espacial de la K presentó dependencia espacial moderada y se correlacionó significativamente con la arena, arcilla y RP, mientras que con las demás variables la correlación no tuvo significancia.

Palabras clave: distribución espacial, kriging ordinario, efecto pepita.

ABSTRACT

In the research the spatial distribution of the hydraulic conductivity and its relationship to the physical properties of the soil in the Luyando district were evaluated. For the methodology, the research was of a non-experimental, descriptive and cross-sectional [type] research, where the hydraulic conductivity (K) and were moderately low, and the pb, RD and Phi were low. The variograms of the spatial distribution revealed that the most optimal fits were obtained with the Gaussianos, exponential, spherical, and circular models for the K, sand, silt and PR variables, respectively. The variables exhibited a moderate spatial dependence, characterized by relatively high ranges, while the pb, RD, Phi, and clay presented a nugget effect (EPP – abbreviation in Spanish) or spatial the physical indicators: texture, apparent density (pb; DA in Spanish), relative density (RD; DR in Spanish), porosity (Phi; PT in Spanish), [and the] mechanical resistance to penetration (PR; RP in Spanish) were evaluated. The spatial distribution of the K was done using the ordinary Kriging (OK; KO in Spanish), and their relationship with the physical indicators [were evaluated] using the Pearson correlation. The results revealed that the variability of the K was very high, the PR was moderately high, the sand content was moderate, the silt and clay content independence. In conclusion, the spatial distribution of the K presented a moderate spatial dependence and it was significantly correlated to the sand, clay and PR; while for the rest of the variables, the correlation did not have significance.

Keywords: spatial distribution, ordinary kriging, nugget effect.

I. INTRODUCCION

La variabilidad de suelos en el Perú es notable y se atribuye a la diversidad geográfica y climática que caracteriza al país. Esta diversidad se evidencia en diferentes regiones, desde la árida costa hasta las elevadas cumbres de los Andes y las extensas llanuras de la Amazonía. Según datos del Instituto Nacional de Recursos Naturales (2009), en el Perú se reconocen 33 asociaciones de unidades de suelos. Además, el Gobierno Regional de Huánuco (2016) ha identificado 20 unidades de suelo a nivel de subgrupo, distribuidas en diez asociaciones de unidades de suelos en la Provincia de Leoncio Prado. Estos hallazgos subrayan la complejidad y la riqueza de la variabilidad de suelos en el contexto geográfico del Perú.

El distrito de Luyando exhibe una fisiografía diversa y se destaca por la adopción de diversos usos del suelo, que van desde áreas de conservación hasta expansiones continuas destinadas a la agricultura y la construcción de viviendas. Estas actividades han dado lugar a alteraciones espaciotemporales en las propiedades del suelo, incrementando su heterogeneidad, especialmente en lo que respecta a la conductividad hidráulica del suelo. Este parámetro guarda una estrecha relación con otros atributos físicos del suelo, como la densidad aparente, porosidad y textura, de manera que incluso variaciones mínimas en estos pueden tener un impacto significativo en la conductividad hidráulica. La comprensión de estas interrelaciones es esencial para evaluar adecuadamente la dinámica del suelo en el distrito de Luyando y abordar de manera efectiva los desafíos asociados con su variabilidad.

Cuando los parámetros exhiben coeficientes de variación demasiado elevados, como es el caso de la conductividad hidráulica, los métodos estadísticos clásicos enfrentan dificultades para abordar este desafío. De acuerdo con Olaya (2014), una alternativa para superar este problema es la interpolación, que permite calcular los valores de un parámetro en ubicaciones no muestreadas, con la consecuente reducción de los costos excesivos asociados al muestreo. En este contexto, se recomienda el kriging como el método de interpolación más eficaz, dado que asegura un error mínimo en las estimaciones.

De acuerdo con la problemática expuesta se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál es la distribución espacial de la conductividad hidráulica y su relación con las propiedades físicas del suelo?

La investigación se justifica en la necesidad de conocer la distribución espacial de la conductividad hidráulica (K) y su relación con las propiedades físicas del suelo a través del análisis geoestadístico. Además, estudios sobre la variabilidad espacial de la K del suelo solo se han realizado hasta la fecha a pequeña escala o a escala de campo (Curay, 2018; Mestas et

al., 2010 & Gumiere et al., 2014). Sin embargo, la variabilidad a una escala regional más grande es poco conocida, ya que la caracterización espacial adecuada de la K es altamente heterogénea y requiere una gran cantidad de mediciones directas laboriosas, costosas y que requieren mucho tiempo. Asimismo, a pesar de que se realizaron diversos estudios relacionados a la distribución espacial de la K, la información aún es escasa.

Los resultados de la investigación proporcionarán un punto de referencia para la formulación de planes y proyectos relacionados al desarrollo de prácticas de manejo adecuadas para reducir los impactos negativos sobre el suelo, bajo dirección de instituciones gubernamentales como la Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas (DEVIDA) y Proyecto Especial Alto Huallaga (PEAH). Además, los datos recolectados serán útiles para futuras investigaciones relacionadas con el mismo tema, o para cualquier otro propósito que se considerado apropiado.

La investigación contrastó parcialmente la hipótesis: “Si existe variabilidad espacial de la conductividad hidráulica y se relaciona significativamente con algunas propiedades físicas del suelo”.

1.1. Objetivo general

Determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica y su relación con las propiedades físicas del suelo en el distrito de Luyando.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo: textura, porosidad total, densidad aparente, densidad real y resistencia mecánica a la penetración.
- Analizar la correlación espacial de conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo.
- Representar la distribución espacial de la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo a través del modelo geoestadístico de mejor ajuste utilizando Kriging Ordinario.
- Determinar la relación de la conductividad hidráulica con otras propiedades físicas del suelo a través del coeficiente de correlación de Pearson.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo influyen y determinan en gran parte las posibilidades de uso que el hombre pueda dar a este recurso debido a la sinergia que tienen con las propiedades químicas y biológicas del suelo. La interdisciplinariedad de estas propiedades determinan características edáficas como la rigidez y capacidad portante, plasticidad, aireación, almacenamiento de agua y capacidad de drenaje, facilidad de penetración de las raíces y retención de nutrientes, por lo que es fundamental que los involucrados en el manejo del suelo conozcan las propiedades físicas del suelo para comprender en qué medida y cómo afectan el desarrollo de las plantas y cómo se alteran por la actividad antrópica llegando a entender la importancia de mantener las propiedades físicas del suelo en las mejores condiciones posibles (Rucks et al., 2004).

2.1.1. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es una medida cuantitativa de la capacidad de un suelo saturado para transmitir agua cuando se somete a un gradiente hidráulico y expresa la tasa de infiltración del agua al atravesar los poros del suelo en estado de saturación (USDA, 2017). Es un parámetro hidro-físico que incide en la relación agua-suelo-planta asociado al movimiento del agua y refleja las condiciones de transmisibilidad del suelo en campo que varía según la profundidad o estrato del perfil en el que se realice la medición debido a la heterogeneidad del suelo (Deb & Shukla, 2012). También se destaca la conductividad hidráulica del suelo de sus propiedades físicas por su relevancia en el campo de la ingeniería en cuanto se refiere al diseño de proyectos de irrigación, drenaje y conservación del suelo.

Tabla 1. Clasificación de la conductividad hidráulica

Descripción	Conductividad hidráulica (cm/h)
Muy lenta	<0,10
Lenta	0,1 – 0,5
Moderadamente	0,5 - 2
Moderadamente lenta	2 - 6
Moderadamente rápida	2 - 12
Rápida	12 - 18
Muy rápida	>18

Fuente: Villón (2007)

2.1.2. Textura

La textura del suelo es la proporción o cantidades relativas de las partículas minerales que tienen un diámetro menor a 2 mm y según su tamaño pueden ser arena, limo y arcilla (USDA, 2017).

Tabla 2. Descripción de las partículas minerales del suelo

Partícula	Diámetro	Descripción
Arena	2.00 - 0.05 mm	Sus partículas individuales son observables a simple vista. Por su gran tamaño y forma irregular, el contacto entre partículas de arena es limitado, lo que dificulta la formación de agregados estables en el suelo.
Limo	0.05 - 0.002 mm	Su tamaño hace que sean observables al microscopio. Por la combinación de su área superficial y el tamaño de sus poros, esta partícula tiene la más alta capacidad retentiva de agua disponible.
Arcilla	<0.0002 mm	Son observables solo a través de microscopios electrónicos. Cuando se humedecen, forman agregados que al secarse son bastante duros. El grado de cohesión y adhesión varía según la clase de arcilla; cuanto más fina, más duro el terrón que se forma.

Fuente: Zavaleta (1992)

De acuerdo con las proporciones de los tres componentes minerales principales (arena, limo y arcilla), una muestra de suelo se le puede asignar una de las 12 clases texturales representadas en el triángulo textural (Figura 1) cuyo porcentaje de las fracciones granulométricas ha sido determinado previamente en laboratorio siendo el método más utilizado el hidrómetro de Bouyoucos (Jaramillo, 2002; USDA, 2017). Para que un suelo se considere “arcilloso” ha de tener mínimo 40 % de arcilla mientras que para la asignación de textura “arenosa” a un suelo, este debe tener 85 % de arena a más. De acuerdo con Duchaufour (2001), citado por Porta et al. (2003), los suelos de textura media poseen proporciones equilibradas de partículas minerales que optimizan el beneficio de los cultivos en su mayoría al tener 25 % de arcilla, 40 – 45 % de arena y 30 – 35 % de limo.

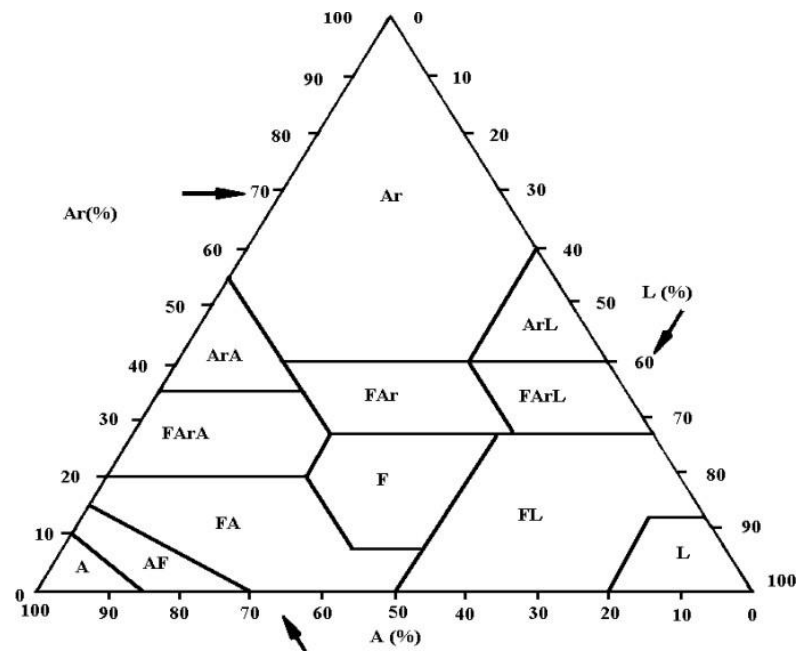


Figura 1. Triángulo textural

Fuente: Jaramillo (2002)

2.1.3. Porosidad

La porosidad del suelo es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total, este espacio vacío no está ocupado por sólidos y está disponible para la fase líquida y gaseosa del suelo (Porta et al., 2003). Este parámetro depende la proporción granulométrica (textura) y del arreglo de estas partículas sólidas para formar agregados (estructura). La porosidad total del suelo está conformada por microporos y macroporos, ambos son responsables del flujo de agua por gravedad y capacidad de retención de humedad absorbible para las plantas respectivamente (Jaramillo, 2002 & Rucks et al., 2014). A continuación, se muestra la clasificación del tamaño de los poros del suelo propuesta por el Soil Science Division Staff (USDA, 2017):

Tabla 3. Clasificación de poros del suelo

Tipo de poros	Diámetro (mm)
Muy gruesos	>10
Gruesos	10 - 5
Medios	5 - 2
Finos	2 - 0,5
Muy finos	<0,5

Fuente: USDA (2017)

Las arcillas se destacan por ser abundantes en microporos favoreciendo la retención de humedad, pero puede exhibir escasez de aireación; mientras que, los suelos con

predominancia de arenas son ricos en macroporos manifestando una elevada tasa de infiltración y baja retención de humedad. De acuerdo a Jaramillo (2002), el valor teórico óptimo de porosidad para un suelo es el 50 % de su volumen. Los macroporos y microporos para un suelo ideal deben de tener una proporción equivalente donde el porcentaje de la porosidad capilar (microporos) no esté por debajo del 20 – 25 % de la porosidad total del suelo. La cualificación de la porosidad total del suelo se muestra a continuación:

Tabla 4. Cualificación de la porosidad

Porosidad (%)	Cualificación
>70	Excesiva
55 - 70	Excelente
50 - 55	Satisfactoria
40 - 50	Baja
<40	Muy baja

Fuente: Kaurichev (1984)

2.1.4. Densidad aparente

Es la densidad aparente es la masa de suelo seco por unidad de volumen en estado natural donde se incluyen el espacio poroso y está directamente relacionado con su composición granulométrica, estructura y contenido de compuestos orgánicos (Jaramillo, 2002). Este parámetro sirve como indicador de suelos compactados asociado a las prácticas de manejo de los suelos provocando alteraciones con el paso del tiempo debido al laboreo, tránsito de maquinaria y pisoteo de animales (Agostini et al., 2014).

Al relacionar la textura con la densidad aparente, en los suelos arcillosos o de textura fina se califica alto el valor de la densidad aparente a partir de 1,3 g/cm³, mientras que valores superiores a 1,4 g/cm³ se atribuye a los suelos de textura media y a los suelos arenosos por encima de 1,6 g/cm³ se considera elevado (Cortés y Malagón, 1984; citado por Jaramillo, 2002). En general, los suelos que presentan valores bajos de en su densidad aparente se caracterizan por tener buenas condiciones en cuanto a sus propiedades físicas, mientras tanto, la elevada densidad aparente en los suelos indica deficientes condiciones físicas (Sánchez et al., 2003).

Por otra parte, según Kaurichev (1984), la densidad de los suelos minerales varía entre 1,0 y 1,8 g/cm³ (**Tabla 5**) proponiendo la siguiente clasificación cualitativa:

Tabla 5. Cualificación de la densidad aparente

Densidad (g/cm ³)	Cualificación
<1	Suelo esponjoso
1 – 1,1	Suelos recientemente labrados
1,2	Campo labrado compactado
1,3 – 1,4	Campo labrado muy compactado
1,4 – 1,6	Horizontes superficiales compactados
1,6 – 1,8	Horizontes iluviales muy compactados

Fuente: Kaurichev (1984)

2.1.5. Densidad real

La densidad real del suelo es la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen que ocupan sin considerar su arreglo espacial (estructura) y volumen de vacíos (porosidad), por lo que el valor de este parámetro depende netamente de la naturaleza de las partículas minerales y de las sustancias orgánicas asociadas a ellos (Jaramillo, 2002 & Kaurichev, 1984). Para los suelos minerales se considera como valor medio de su densidad real 2,65 g/cm³. Según Porta et al. (2003), los valores que más se frecuentan en la práctica para los tipos de horizontes son los siguientes:

Tabla 6. Densidad real para los horizontes del suelo

Densidad real	Horizontes
2,6 – 2,75	Minerales
1,1 – 1,4	Orgánicos
2,75	Ricos en minerales pesados

Fuente: Porta et al. (2003)

2.1.6. Resistencia mecánica a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) se refiere a la fuerza resistiva que ejerce el suelo in situ a la aplicación de una fuerza externa penetrante mediante un instrumento rígido hasta una profundidad conocida (Jaramillo, 2002 & USDA, 2017). Esta resistencia mecánica depende de algunas propiedades físicas como la textura, estructura y densidad aparente llegando a incidir en la profundidad de exploración de las raíces, movimiento de agua y transporte de nutrientes (Pedro, 2003).

La RP es una propiedad del suelo muy variable que cambia con el tiempo y en el espacio (Pelegrin et al., 1996) cuyas alteraciones se asocian a las actividades que se desarrollan en la agricultura mediante las prácticas de labranza y tránsito de maquinaria que generan compactación en el suelo y disminución de la DA al existir relación directamente proporcional entre la RP y el grado de compactación (Jiménez, 1992).

2.2. Sistema de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es la integración de herramientas informáticas y datos digitales relacionado a la superficie terrestre que pueden ser sometidos a análisis e interpretación; en tal sentido, un SIG está constituido por datos espaciales, programas, ordenadores y periféricos, usuarios y administradores del sistema (Sarría, 2006). Olaya (2014) describe a los SIG como una serie de elementos interconectados con funciones particulares integrado por datos, procesos, software, hardware y factor organizativo que permiten capturar, almacenar, analizar, editar y representar datos georreferenciados.

Los SIG han evolucionado de forma rápida y en la actualidad su uso frecuente y eficacia lo ha convertido en una herramienta de múltiples aplicaciones de principal uso en la resolución de problemas espaciales. Las herramientas de SIG se incorporan a muchas ciencias y contribuyen a la formación de nuevas ramas destacando en el ámbito científico especialmente relacionado al medio ambiente, también brinda soporte en las administraciones públicas con la planificación urbana y ordenamiento territorial, a organizaciones no gubernamentales, empresas de servicios públicos, marketing, transporte y agricultura (Rodríguez & Olivella, 2010).

En la agricultura los SIG sirven en el desarrollo de técnicas conocidas como “agricultura de precisión” que consiste en la elaboración de mapas a detalle que ayudan a planificar cultivos, analizar los sembríos y planear una fertilización eficiente mediante la introducción de información agraria a un SIG, tales como la información hidrológica del área en estudio, información topográfica, edafológica y demás características que se relacionen con el rendimiento de las producciones agrícolas (Rodríguez & Olivella, 2010).

2.3. Geoestadística

En la década de 1960, Matheron introdujo el neologismo "Geoestadística", consolidándose como el preeminente exponente de esta disciplina. Reconocido como el progenitor de la misma, Matheron procedió a formalizar y axiomatizar de manera matemática un conjunto de métodos previamente concebidos por D. G. Krige en 1941. Estos métodos se basaban en la explotación de la correlación espacial con el propósito de realizar proyecciones en el contexto de la evaluación de reservas minerales, específicamente en las minas de oro sudafricanas.

La geoestadística constituye un dominio de la estadística aplicada que se focaliza en la examinación y modelación de la variabilidad espacial dentro del ámbito de las ciencias terrestres. Su ámbito de estudio se centra en el análisis y la proyección de fenómenos que

exhiben variabilidad en términos espaciales y/o temporales, como, por ejemplo, la distribución de metales, porosidades, concentraciones de contaminantes, entre otros. A pesar de que el prefijo "geo-" suele asociarse comúnmente con la geología, es relevante destacar que los cimientos de la geoestadística se encuentran en el contexto de la minería (Díaz, 2002).

2.3.1. Variable regionalizada

La Geoestadística aplica la Teoría de las Variables Regionalizadas para estimar procesos o fenómenos geológicos distribuidos en el espacio. Hablamos de variables regionalizadas precisamente para subrayar el aspecto espacial de los fenómenos. Una variable regionalizada es, sensu stricto, una función real, que toma un valor definido en cada punto del espacio (Matheron, 1963).

Matheron (1963) explica algunas nociones acerca de la variable regionalizada resaltando los siguientes:

- a) En primer lugar, una variable regionalizada está localizada. Sus variaciones se producen en el espacio, que se denomina campo geométrico de la regionalización. Por otra parte, tal variable se define en general sobre un soporte geométrico (Matheron, 1963). En el caso de una cuenca, este soporte no es más que el área de la muestra, con su forma geométrica, su tamaño y su orientación.
- b) En segundo lugar, la variable presenta una continuidad más o menos estable en su variación espacial, que puede expresarse mediante una desviación más o menos importante entre los valores de las muestras vecinas. En algunas circunstancias, incluso esta continuidad "en media" no se confirmará, y entonces hablaremos de efecto pepita.
- c) Por último, la variable puede mostrar distintos tipos de anisotropías. Puede existir una dirección preferente a lo largo de la cual los grados no varían significativamente, mientras que varían rápidamente a lo largo de una dirección transversal. Estos fenómenos son bien conocidos bajo el nombre de recorridos o zonalidades.

2.4. Correlación espacial

2.4.1. Índice de Morán

El índice de Moran es una medida de autocorrelación espacial que se utiliza para evaluar la distribución espacial de los valores de una variable en un conjunto de ubicaciones geográficas (Celemin, 2009). La autocorrelación espacial implica que los valores de una variable en ubicaciones cercanas tienden a ser más similares entre sí que los valores en ubicaciones más distantes. La fórmula básica del índice de Moran es:

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Donde:

N es el número de ubicaciones geográficas.

W es el peso total en la matriz de pesos espaciales.

x_i y x_j son los valores de la variable en las ubicaciones i y j respectivamente.

\bar{x} es la media de todos los valores de la variable.

w_{ij} es el elemento en la fila i y columna j de la matriz de pesos espaciales.

En términos más simples, el numerador de la fórmula mide la covarianza espacial, es decir, cuánto se parecen los valores de una ubicación a los valores de sus vecinos, y el denominador estandariza esto en relación con la varianza global de los valores. El resultado del índice de Moran es un valor que puede oscilar entre -1 y 1:

- $I > 0$: Autocorrelación positiva (agrupamiento espacial), lo que significa que las ubicaciones similares tienden a agruparse.
- $I < 0$: Autocorrelación negativa (dispersión espacial), lo que indica que las ubicaciones similares tienden a dispersarse.
- $I = 0$: No hay autocorrelación espacial.

2.4.2. Semivarianza

La semivarianza, introducida inicialmente por Matheron (1963), es una medida de similitud que evalúa la relación entre observaciones ubicadas a distancias específicas. Diversos autores sugieren que, idealmente, los datos analizados mediante semivarianza deberían exhibir una distribución normal y cuadrática (Tragmar et al., 1985). Como mínimo, se espera que haya semejanza en la distribución, lo que indica similitudes entre los datos. Incluso en ausencia de una distribución normal, es esencial que los datos presenten uniformidad en la varianza. Aunque la falta de estacionariedad en los datos no afecta significativamente el análisis de semivarianza, Webster & Oliver (2007) destacan que las semivarianzas son sensibles a distribuciones de datos sesgadas y a la presencia de valores atípicos o extremos.

2.4.3. Semivariograma

Los semivariogramas son una representación gráfica en un sistema de coordenadas cartesianas. En el eje vertical (de las ordenadas) se grafica la semivarianza. En el eje horizontal (de las abscisas) se representa un vector cuya longitud equivale al intervalo de

muestreo. Este vector varía en dirección y sentido a lo largo del eje x. (González, Guerra & Gómez, 2006).

Los semivariogramas experimentales pueden ser ajustados mediante la aplicación de diversos modelos teóricos de semivarianza disponibles. Estos modelos matemáticos tienen como objetivo capturar de manera precisa el comportamiento y la estructura de la dependencia espacial que define a los datos y estos patrones se visualizan de manera gráfica a través del semivariograma empírico. En términos generales, estos modelos se pueden clasificar en dos categorías: no acotados, que incluyen formas lineales, logarítmicas y potenciales, y acotados, que comprenden formas esféricas, exponenciales y gaussianas (Warrick et al., 1986). Los modelos de la segunda categoría aseguran una covarianza finita de los incrementos, lo que los convierte en elecciones comunes cuando hay evidencia de un ajuste adecuado. Según Giraldo (2002), todos estos modelos comparten tres parámetros comunes que se detallan a continuación:

- **Nugget o efecto pepita (C_0):** Constituye una discontinuidad puntual en el semivariograma que se localiza en el origen. Su origen puede atribuirse a errores aleatorios en las mediciones de la variable analizada o a variaciones que ocurren a una escala más fina que la distancia mínima entre muestras. En ciertos contextos, su presencia puede sugerir que una porción de la estructura espacial está concentrada a distancias más cortas que las observadas.
- **Sill o meseta ($C_0 + C_1$):** La meseta en el semivariograma se refiere al valor máximo que puede alcanzar dicho semivariograma. También puede interpretarse como el valor de semivarianza al cual se estabiliza la función cuando la distancia entre muestras (h) tiende a ser muy grande. En la notación de los modelos, este parámetro se denota comúnmente C_1 o bien $(C_0 + C_1)$ si existe un efecto pepita (C_0) distinto de cero. Se plantea que en un modelo preciso de la realidad esta no debería exceder la mitad del valor de la meseta. Es decir que idealmente se debe cumplir $C_0 \leq C_1/2$.
- **Rango (a):** Desde una perspectiva práctica, el rango se refiere a la distancia a partir de la cual dos observaciones dejan de tener influencia mutua. En otras palabras, representa la zona en la que la dependencia espacial entre las observaciones disminuye. No obstante, ciertos modelos teóricos no logran alcanzar una estabilización completa, manifestando un aumento gradual incluso para distancias considerables entre muestras. En estas circunstancias, se recurre al concepto de "rango efectivo" para expresar la distancia en la cual se alcanza el 95% del valor de la meseta. En otras palabras, se refiere a la distancia en la cual las observaciones

están fundamentalmente descorrelacionadas espacialmente. De este modo, valores reducidos de este parámetro efectivo indican una disminución más rápida de la dependencia espacial, aproximándose tempranamente a un comportamiento aleatorio no autocorrelacionado. Contrariamente, un rango efectivo más extenso refleja patrones de correlación persistentes en el espacio.

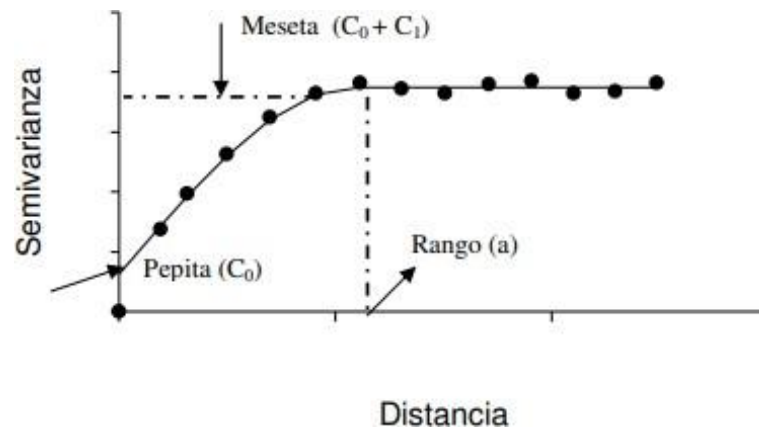


Figura 2. Parámetros básicos del semivariograma

2.4.4. Modelos de semivariograma

Algunos de los modelos teóricos ampliamente utilizados incluyen el modelo esférico, exponencial, gaussiano, potencia, entre otros. La elección del modelo más apropiado está condicionada por factores como la naturaleza del fenómeno o variable analizada y el patrón de autocorrelación espacial inherente. El procedimiento de ajuste implica la selección de un modelo teórico específico y la estimación de sus parámetros, tales como la meseta, el rango, el pepita o efecto nugget, entre otros. El objetivo es lograr que la curva modelada se aproxime de manera óptima al semivariograma experimental derivado de los datos. Un ajuste preciso posibilita la inferencia de la estructura espacial, e incluso facilita la realización de predicciones espaciales mediante técnicas como el kriging.

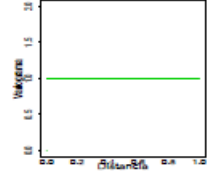
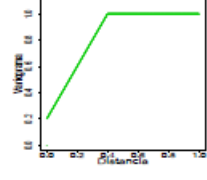
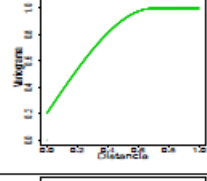
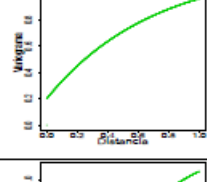
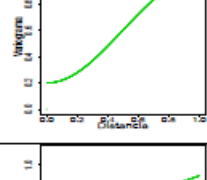
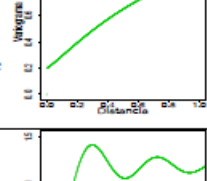
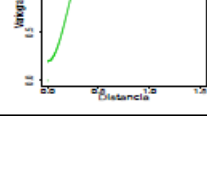
Modelo	Función de Semivariograma	Variograma
Efecto pepita	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 & \text{si } h > 0 \\ 0 & \text{si } h = 0 \end{cases}$	
Lineal con meseta	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_s \left(\frac{h}{a_l}\right) & \text{si } 0 \leq h \leq a_l \\ c_0 + c_s & \text{si } h > a_l \end{cases}$	
Esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ c_0 + c_s \left(\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a_s}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a_s}\right)^3\right) & \text{si } 0 \leq h \leq a_s \\ c_0 + c_s & \text{si } h > a_s \end{cases}$	
Exponencial	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_s(1 - \exp(-3h/a_e)) & \text{si } h > 0 \\ 0 & \text{si } h = 0 \end{cases}$	
Gaussiano	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_s(1 - \exp(-3h^2/a_g^2)) & \text{si } h > 0 \\ 0 & \text{si } h = 0 \end{cases}$	
Circular	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ c_0 + c_s \left(1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{h}{a_c}\right) - \frac{2h}{\pi a_c} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}\right) & \text{si } 0 \leq h \leq a_c \\ c_0 + c_s & \text{si } h > a_c \end{cases}$	
Efecto agujero	$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_s \left(1 - \frac{\sin(h)}{h}\right) & \text{si } h > 0 \\ 0 & \text{si } h = 0 \end{cases}$	

Figura 3. Modelos de semivariograma

Fuente: Melo (2012)

2.5. Predicción espacial

2.5.1. Distribución espacial

La distribución espacial se basa en la modelización de una variable en el espacio para predecir su comportamiento en regiones no muestreadas mediante herramientas de un SIG y amplían la capacidad de las tradicionales técnicas estadísticas de análisis las cuales forman parte de la geoestadística (Sarría, 2006). Los análisis geoestadísticos operan dentro de

dos etapas. En la primera se realiza el análisis estructural de los puntos en el espacio y se describe la correlación entre ellos; en la etapa siguiente se predice la variable en sitios no muestreados mediante diversas técnicas de interpolación espacial (Giraldo, 2002).

La distribución espacial de las propiedades del suelo, incluida la conductividad hidráulica saturada, puede evaluarse mediante estadísticas clásicas y espaciales. La estadística clásica puede analizar adecuadamente variables independientes del espacio. Sin embargo, cuando ocurre la variación aleatoria, el análisis geoestadístico que incluye semivariogramas directos y semivariogramas cruzados es el más apropiado (Uzowicz & Lipiec, 2021).

2.5.2. Método Kriging

El término kriging se acuñó alrededor de 1960 en honor a D. G. Krige, quien por sus trabajos de predicción de depósitos auríferos es considerado pionero del uso de la correlación e interpolación espacial (Díaz, 2002), sirviendo de base para que el matemático francés Georges Matheron estableciera los primeros conceptos teóricos de la geoestadística (Martínez y Ramírez, 2005).

El kriging es un método de interpolación no determinista (estocástico) que se aplica de forma local y global (Olaya, 2014). Este método brinda una estimación lineal más eficiente de una variable y proporciona la varianza o error estimado que indica la calidad de la estimación, el cual depende de la localización de los puntos de muestreo y del variograma obtenido a partir de estos datos (Balzarini et al., 2014). Este método establece sus bases en el comportamiento de una variable en el espacio, donde la covarianza de un punto conocido y un punto con valor que se debe predecir, disminuye de forma paralela al incremento de la distancia entre ambos puntos. Según Olaya (2014), la finalidad del kriging es brindar una forma puntual de establecer óptima ponderación entre puntos al interpolarse localmente y el kriging cubre los siguientes requisitos para esta óptima interpolación:

- El error de predicción debe de ser mínimo.
- Los puntos cercanos deben tener pesos mayores que los lejanos.
- La presencia de un punto cercano en una dirección dada debe restar influencia a puntos en la misma dirección, pero más lejanos.
- Puntos muy cercanos con valores muy similares deben agruparse, de tal manera que no aparezca sesgo por sobremuestreo.
- La estimación del error debe hacerse en función de la estructura de los puntos, no de los valores.

Dentro del kriging existen variantes de interpolación espacial que utilizan simultáneamente todos los puntos muestrales y entre ellos se destacan el kriging universal, ordinario y simple. El kriging ordinario estima la media de forma local ponderando puntos cercanos entre sí. El kriging simple es utilizado cuando se conoce la media de la variable. La media es estimada en el kriging universal, además incluye la tendencia espacial de los datos que influyen la predicción (Balzarini et al., 2014).

2.6. Estado de arte

2.6.1. Antecedentes nacionales e internacionales

En Taboada, Lugo, España, Dafonte et al. (2001) realizaron la distribución espacial de la conductividad hidráulica saturada (K_s) en un área dedicada a usos agrícolas y forestales. Se utilizaron técnicas de interpolación, como kriging y cokriging. Los resultados derivados del análisis geoestadístico de los datos indicaron que la aplicación del logaritmo a los valores de K_s , reveló una estructura espacial más precisa. Tras el análisis de los modelos de kriging ordinario, cokriging colocalizado, y cokriging ordinario, se llegó a la conclusión de que no se observaron disparidades significativas en los mapas estimados, ya que se logró una correlación efectiva que superó los 200 metros.

Guatibonza et al., en 2008, llevaron a cabo un estudio de la distribución espacial de la conductividad hidráulica (K_s) y diversas propiedades físicas del suelo en Boyacá, Colombia utilizando Kriging Ordinario como método de interpolación. Concluyeron que los modelos esférico, gaussiano y exponencial son los más adecuados y que las variables exhibieron niveles variables de dependencia espacial, abarcando desde fuerte hasta moderada, con rangos fluctuantes entre 22,5 y 242 metros. Los índices de variación de la K_s se situaron en niveles bajos a muy bajos y se correlacionó significativamente con la porosidad y densidad aparente del suelo.

Uzowicz y Liepic (2021) realizaron estudios con la finalidad de evaluar la distribución espacial de la conductividad hidráulica (K) a escala regional en el sureste de Polonia y su relación con otras propiedades físicas y químicas del suelo utilizando el programa GS+ 6.1. Concluyeron que los modelos a los cuales se ajustaron mejor los datos fueron al exponencial y entre las propiedades del suelo estudiadas, la conductividad hidráulica fue la más variable (C.V. = 77,3%) y significativamente ($p < 0,05$) correlacionada de manera positiva con la porosidad total ($r = 0,300$) y negativamente correlacionada con la densidad aparente del suelo ($r = -0,283$).

Mogollón et al. (2012) efectuaron el análisis espacial de los atributos hidrofísicos de suelo con diferentes usos en el Municipio de Cundinamarca, Colombia. Para el análisis geoestadístico utilizaron el software GS+ v.9. y el interpolador Kriging Ordinario. Las variables RP, humedad, arcilla y limo se ajustaron a modelos esféricos mientras que la Ks, DA, macro y microporosidad mostraron mejores resultados con modelos exponenciales. Todas las variables presentaron variabilidad media con rango de 35,70 m a 1227,90 m. La validación cruzada reveló una notoria similitud entre los valores muestreados y los valores modelados, al exhibir coeficientes superiores a 0,70. Este resultado permitió la generación de mapas de distribución espacial confiables.

Ramirez et al. (2008) evaluaron la variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia realizando el muestreo a dos profundidades, entre 0 y 0,10 m y entre 0,10 y 0,20 m. Concluyeron que la RP, DR, PT y los contenidos de arena exhibieron únicamente una dependencia espacial a una profundidad entre 0 y 0.10 m, mientras que, a una profundidad entre 0,10 m y 0,20 m, no se observó una dependencia espacial significativa. Las propiedades se ajustaron a modelos esféricos y gaussianos con fuerte y moderada dependencia espacial alcanzando rangos de 9,70 m a 375,80m.

Eras (2020), realizó la estimación de las relaciones espaciales entre la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo en el cultivo de banano en Machala, Ecuador. El análisis geoestadístico se realizó con el software ArcGIS. Los valores promedio de conductividad hidráulica (K) en los estratos de 0-0,25 y 0,25-0,50 cm oscilan entre 1,330 y 5,275 cm/h, indicando que el movimiento de agua en el suelo de la finca se encuentra en el rango de muy lento a moderado. Concluyó que hubo una alta correlación entre la K y variables como DA, PT y textura del suelo. Además, en las zonas con un elevado contenido de arena, una baja densidad aparente y una alta porosidad, se observó una mayor K.

Inocencio (2022), realizó la distribución y variabilidad espacial de indicadores fisicoquímicos y la calidad del suelo utilizando Kriging, específicamente en el fundo "Cárdenas" ubicado en Nuevo Progreso, Padre Abad. Los resultados mostraron que los modelos lineal y exponencial se ajustaron mejor a las variables. El contenido de arena, limo y los niveles de potasio mostraron dependencia espacial fuerte, mientras que para la materia orgánica (MO), nitrógeno (N), aluminio (Al), capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de aluminio (%SAI) fue moderada y débil para las bases cambiables (%BC) y acidez cambiable (%AC).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en el distrito de Luyando, perteneciente a la provincia de Leoncio Prado en la región Huánuco, ubicada a $9^{\circ} 18' 00''$ latitud Sur y $73^{\circ} 3' 33''$ longitud Oeste y en coordenadas UTM 18S 393800 E, 8979000 N.

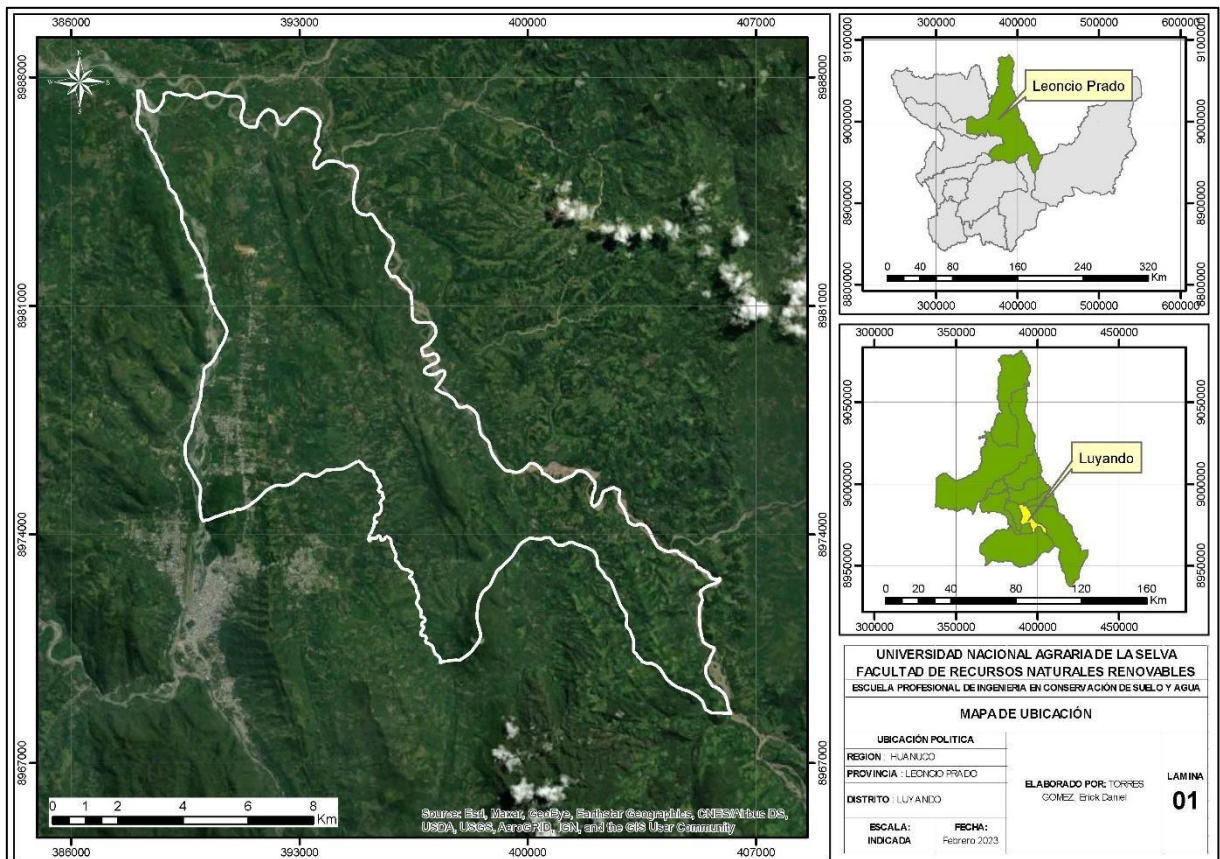


Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio

3.1.1. Clima

La zona de estudio se distingue por poseer un clima templado muy húmedo a lo largo de todo el año, siendo especialmente lluvioso. La precipitación anual varía entre 2000 y 3500 mm, con máximos acumulados entre los meses de noviembre a marzo. En cuanto a las temperaturas, las máximas anuales oscilan entre 25 y 29° C, mientras que las mínimas se sitúan entre 17 y 21° C, según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2020). Según el SENAMHI (2017) basado en el diagrama bioclimático de Holdrige (1967), el área de estudio se caracteriza como Bosque muy Húmedo Premontano Tropical (bmh – PT).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales de campo

Los materiales de campo necesarios son: botas, marcadores, bolsas de polietileno, machete, wincha de 5 metros, guantes super flex, libreta de campo, tabla Munsell, cilindro muestreador, martillo y navaja.

3.2.2. Materiales de laboratorio

Los materiales utilizados en laboratorio serán: tamiz 10 mm de diámetro, probetas de 1000 ml, vasos de precipitado, pipetas, hidrómetro y reactivos diversos.

3.2.3. Equipos de campo

Cámara digital, GPS navegador, penetrómetro, permeámetro de laboratorio y accesorios.

3.2.4. Equipos de laboratorio

Estufa, balanza analítica, agitador de muestras, cronómetro, termómetro digital.

3.2.5. Software

ArcGis Pro, Google Earth Pro, Rstudio, Microsoft Word, Microsoft Excel.

3.3. Metodología

3.3.1. Población y muestra

La población está constituida por el área del distrito de Luyando siendo 11134.5 hectáreas. El número de muestras fue de 77 para la conductividad hidráulica (K) y resistencia mecánica a la penetración (RP), mientras que, para la textura, densidad aparente (DA), densidad real (DR) y porosidad se tuvo 71 puntos de muestreo. Los puntos de muestreo se georreferenciaron utilizando un GPS navegador y su distribución sobre la fisiografía del distrito de Luyando se muestra en la **Figura 5**.

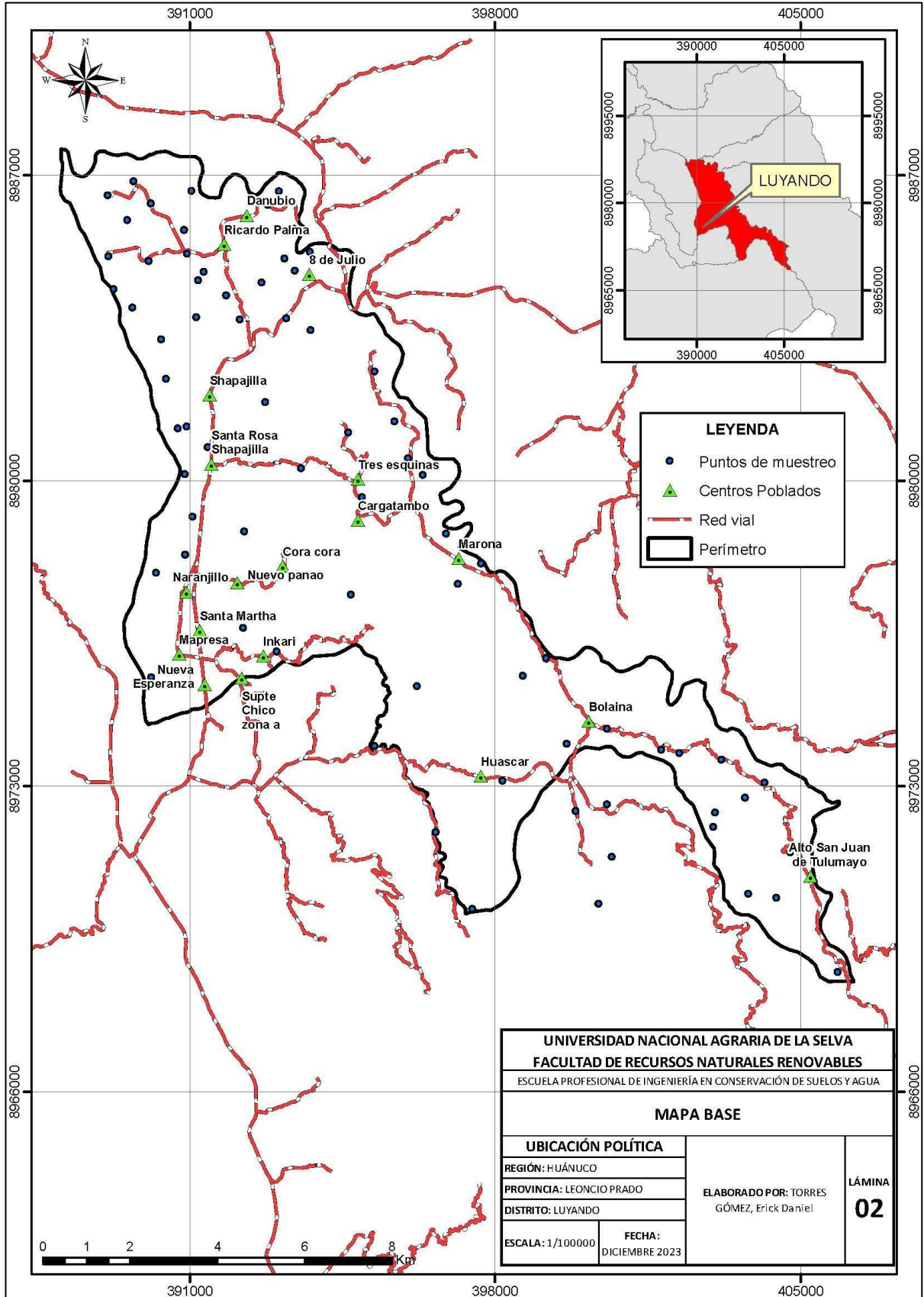


Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo sobre la fisiografía de Luyando

3.3.2. Determinación de las variables en estudio

3.3.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica

La determinación de la conductividad hidráulica se realizó con el permeámetro de laboratorio Eijelkgamp según el siguiente procedimiento:

- a) **Obtención de la muestra:** Se recolectaron muestras de suelo inalteradas en cilindros de dimensiones estandarizadas de altura y \varnothing de 5 cm en localizaciones con posición registrada mediante GPS. La extracción de estas muestras se realizó siguiendo ciertos lineamientos y pautas que se detallan gráficamente en la **Figura 6**:

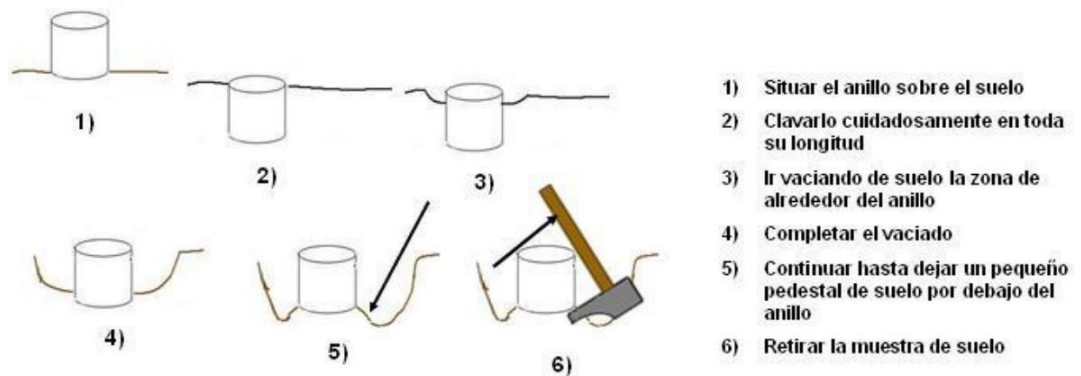


Figura 6. Procedimiento de extracción de muestras

- b) **Saturación de la muestra:** La saturación de las muestras se realizó mediante inmersión de los cilindros en un recipiente con agua, previamente haber colocado una tela o gaza en una de las caras del cilindro la cual estará en contacto con el agua. El periodo necesario para la saturación varió según el tipo de suelo: en el caso de muestras arenosas, el proceso se completó en un día, mientras que los suelos limosos requirieron al menos dos días, y los suelos arcillosos necesitaron tres días.
- c) **Preparación del permeámetro:** Una vez que la muestra fue completamente saturada, se insertó en el tanque del permeámetro mediante el cilindro porta-anillos. Se aguardó a que el agua del tanque fluyera a través de las muestras, inundando la parte superior del cilindro porta-anillos. Cuando los niveles de agua en el tubo porta-anillos y en el tanque se equipararon, se llevó a cabo la medición del flujo mediante la colocación de sifones para transferir el agua desde los tubos porta-anillos a las buretas de medida. Previamente, los sifones se llenaron de agua, situándolos bajo el grifo y moviéndolos gradualmente para expulsar el aire contenido en su interior. Se mantuvo invariable la discrepancia de nivel (h) entre el interior y el exterior del porta-anillos durante la toma de medidas. Para lograrlo, se empleó un recipiente

regulador adaptado a las exigencias del flujo, y se registraron las lecturas con la asistencia de la luz de señal, como se ilustra en la **Figura 7**.

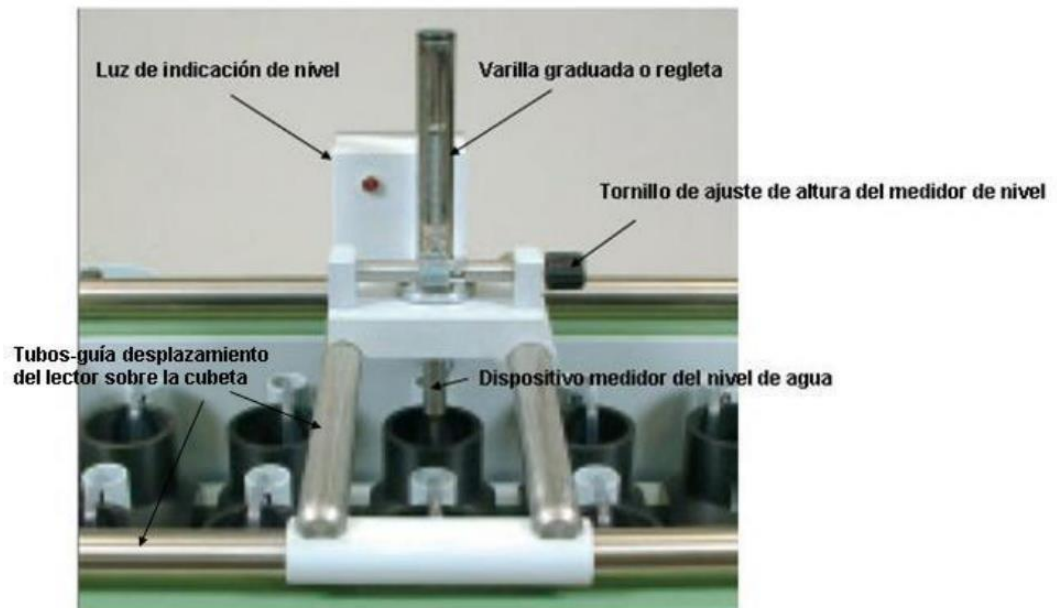


Figura 7. Dispositivo sensor del nivel de agua

- d) Cálculos:** La conductividad hidráulica se determinó a partir del despeje de la ecuación de Darcy:

$$K = \frac{V}{I \times A \times t} \quad (2)$$

Donde:

K = conductividad hidráulica (cm/día)

V = volumen de agua que fluye a través de la muestra (cm³)

h = diferencia de nivel de agua dentro y fuera del porta-anillos (cm)

L = longitud de la muestra (cm)

I = gradiente hidráulico (h/L)

A = área de la sección del cilindro de muestreo

t = tiempo (días)

3.3.2.2. Determinación de las propiedades físicas del suelo

Se recolectaron muestras del área de estudio a una profundidad de 20 cm para la determinación de la textura, densidad aparente, densidad real y porosidad, simultáneamente la resistencia mecánica a la penetración se determinó in situ en cada punto de muestreo.

Tabla 7. Parámetros y métodos de determinación

Parámetros	Método de determinación
Textura	Bouyoucos
Densidad aparente	Método del cilindro
Densidad real	Método del picnómetro
Porosidad	Relación entre la densidad aparente y real
Resistencia mecánica a la penetración	Penetrómetro

3.3.2.3. Prueba de normalidad

Se realizó una evaluación del supuesto de normalidad a los datos utilizando el test de Kolmogórov-Smirnov con la corrección Lilliefors con un nivel de significancia del 5%. En caso de que los datos no exhibieran una distribución normal, se procedió a aplicar una transformación logarítmica. Posteriormente, se procedió a realizar una segunda aplicación del test de normalidad con el fin de analizar la idoneidad de los datos transformados con respecto a una distribución normal.

3.3.2.4. Autocorrelación espacial

Se llevó a cabo un análisis de autocorrelación espacial utilizando el índice de Moran (I de Moran). En este contexto, se utilizó el programa Rstudio, empleando una distancia Euclidiana y realizando una simulación de Montecarlo con 3000 iteraciones. Los parámetros que no cumplieran con el test se procedieron de descartarlos del modelado espacial por falta de autocorrelación.

3.3.2.5. Distribución espacial

Luego de verificar los supuestos de normalidad y autocorrelación espacial, con los datos georreferenciados se procederá a realizar la interpolación a través de kriging ordinario (KO) y determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo por medio del software ArcGis Pro.

3.3.2.6. Correlación de Pearson

La contrastación de la hipótesis se realizará mediante el coeficiente r de Pearson y se clasificará la correlación de acuerdo a los rangos propuestos por Hernández et al., (2014).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades físicas del suelo

4.1.1. Estadísticos descriptivos

La **Tabla 7** exhibe la estadística descriptiva concerniente a la conductividad hidráulica (K) y las propiedades físicas del suelo. Se realizaron 77 puntos de muestreo para la K y la resistencia mecánica a la penetración (RP), mientras que para las demás propiedades se redujo a 71.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos

Parámetro	Und.	Media	Mínimo	Máximo	CV (%)	Asimetría	Curtosis
Conductividad hidráulica	m/día	0,96	0,11	5,70	97,50	2,66	11,92
Arena	%	26,87	4,96	72,68	53,15	0,70	3,26
Limo	%	38,21	15,00	64,40	26,53	0,33	3,10
Arcilla	%	34,78	12,32	65,04	38,43	0,42	2,40
Densidad aparente	g/cm ³	1,10	0,80	1,34	13,28	-0,13	2,01
Densidad real	g/cm ³	2,60	2,53	2,71	1,58	0,23	2,70
Porosidad	%	47,64	38,38	59,54	11,69	0,18	2,10
RP	kg/cm ²	1,07	0,20	3,25	66,30	1,24	4,25

CV: coeficiente de variación, RP: resistencia mecánica a la penetración

Los valores medidos de K oscilaron entre 0,11 m/día – 5,70 m/día que, según la clasificación de Villon (2007), varía entre lenta y muy rápida. Asimismo, la K promedia 0.96 m/día con coeficiente de variación (CV) de 97,50%, significado de una elevada variabilidad que se relaciona fuertemente con los cambios de las proporciones de arena, limo y arcilla (Moreno et al., 2001) y por los diferentes usos que recibe el suelo dentro del distrito de Luyando. Resultados similares fueron reportados por Guatibonza et al. (2009) y Paz et al. (2001), quienes midieron un CV de 85,49% y 96% respectivamente.

El contenido de arena varió de 4,96% a 72,68% con valor promedio de 26,87%; los valores altos se reportaron en puntos aledaños al Río Huallaga debido al transporte y acumulación histórica de sedimentos que en la actualidad comprenden áreas de amortiguamiento y espacios destinados a cultivo de cacao y plátano. Concomitantemente, se observó una baja concentración de arena en las regiones centrales del área de investigación. El CV del contenido de arena exhibe un incremento del 53,15% en comparación con el valor reportado por Rodríguez (2004), que fue del 19,62% y Guatibonza et al. (2009), 39,19%.

El contenido de limo presentó un CV de 26,53% y varió en un intervalo de 15% - 64,40% con una media de 38,21%. Lozano et al. (2004) informaron resultados similares, con CV del 22,56% para un vertisol de textura arcillosa y del 27,06% para un Entisol

de textura arenosa. Por otra parte, la proporción de arcilla mostró una variabilidad que osciló entre el 12,32% y el 65,04% con un CV de 38,48%. Estos coeficientes de variación son evidentes en los componentes de arena, limo y arcilla, ya que la textura es una propiedad física altamente estable que experimenta cambios mínimos a lo largo del tiempo y en el espacio. La clasificación de la textura del suelo como una propiedad esencial se debe a que, a pesar de las notables variaciones en los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa entre suelos diversos, esta característica no experimenta cambios fácilmente.

La DA presentó un valor medio de $1,10 \text{ g/cm}^3$ y CV de 13,28% oscilando en un intervalo de $0,80 \text{ g/cm}^3 - 1,34 \text{ g/cm}^3$ que, según Kaurichev (1984), varía entre suelos esponjosos y campo labrado muy compactado ya que los valores que puede asumir la densidad aparente están condicionados por diversos factores, entre los que se incluyen la textura, estructura, contenido de materia orgánica del suelo y las prácticas de manejo aplicadas, ya que los suelos de textura fina, con una estructura bien desarrollada y niveles significativos de materia orgánica, exhiben densidades aparentes inferiores en comparación con los suelos de textura gruesa, con una estructura menos desarrollada y bajos niveles de materia orgánica (Rubio, 2010).

La DR es una propiedad con valores más o menos constantes con un CV de 1,58% similares a lo reportado por Salamanca & Sadeghian (2005) con CV de 2,38%. Sus valores estuvieron comprendidos en un intervalo corto de $2,53 \text{ g/cm}^3 - 2,71 \text{ g/cm}^3$ clasificándose como suelos de horizontes minerales (Porta et al., 2003), con valor medio de $2,60 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, la porosidad presentó un valor medio de 47,64% y osciló entre 41,38% - 59,54% que, según Kaurichev (1984), evidencia que los suelos en el distrito de Luyando exhiben niveles de porosidad (PT) clasificados como bajos, satisfactorios y excelentes con CV de 11,69%, cercano a lo reportado por Guatibonza et al. (2009) con CV de 15,89%. Siguiendo el estándar establecido por Warrick & Nielsen (1980), que señala una baja variabilidad para CV inferiores al 12% en las propiedades del suelo, se observa que la DR y PT exhiben una baja variabilidad; este fenómeno se atribuye a la estrecha relación de estas propiedades con la génesis y formación del suelo. Además, muestran características de asimetría y curtosis que son consistentes con una distribución normal.

Los valores de RP oscilaron entre $0,20 \text{ kg/cm}^2$ y $3,25 \text{ kg/cm}^2$, con un promedio de $1,07 \text{ kg/cm}^2$ y una variabilidad notable, representada por CV del 66,30%. La alta variabilidad en la RP puede atribuirse a diversos factores y algunas posibles explicaciones podrían incluir la heterogeneidad en la composición textural del suelo, variaciones en la compactación del suelo, diferencias en la distribución de la humedad, la presencia de capas

duras o compactadas, así como la influencia de prácticas de manejo del suelo (Pérez et al., 2016).

La curtosis y los valores bajos de asimetría del contenido de arena, limo, arcilla y de los valores de DA, DR y PT son consistentes con una distribución normal. Los análisis de normalidad aplicados a la K y RP revelaron una falta de simetría en la distribución, lo que lleva al rechazo de la hipótesis de normalidad. Esta observación coincide con hallazgos anteriores de Moreno et al. (2001) y Paz et al. (2001), quienes sostienen que la K sigue una distribución log-normal; sin embargo, el logaritmo de la K se ajustó mejor a la distribución normal al igual que la RP.

4.2. Correlación espacial

4.2.1. Análisis de tendencias

En la **Tabla 8** se observa el análisis de tendencia de las variables en el plano XZ y YZ.

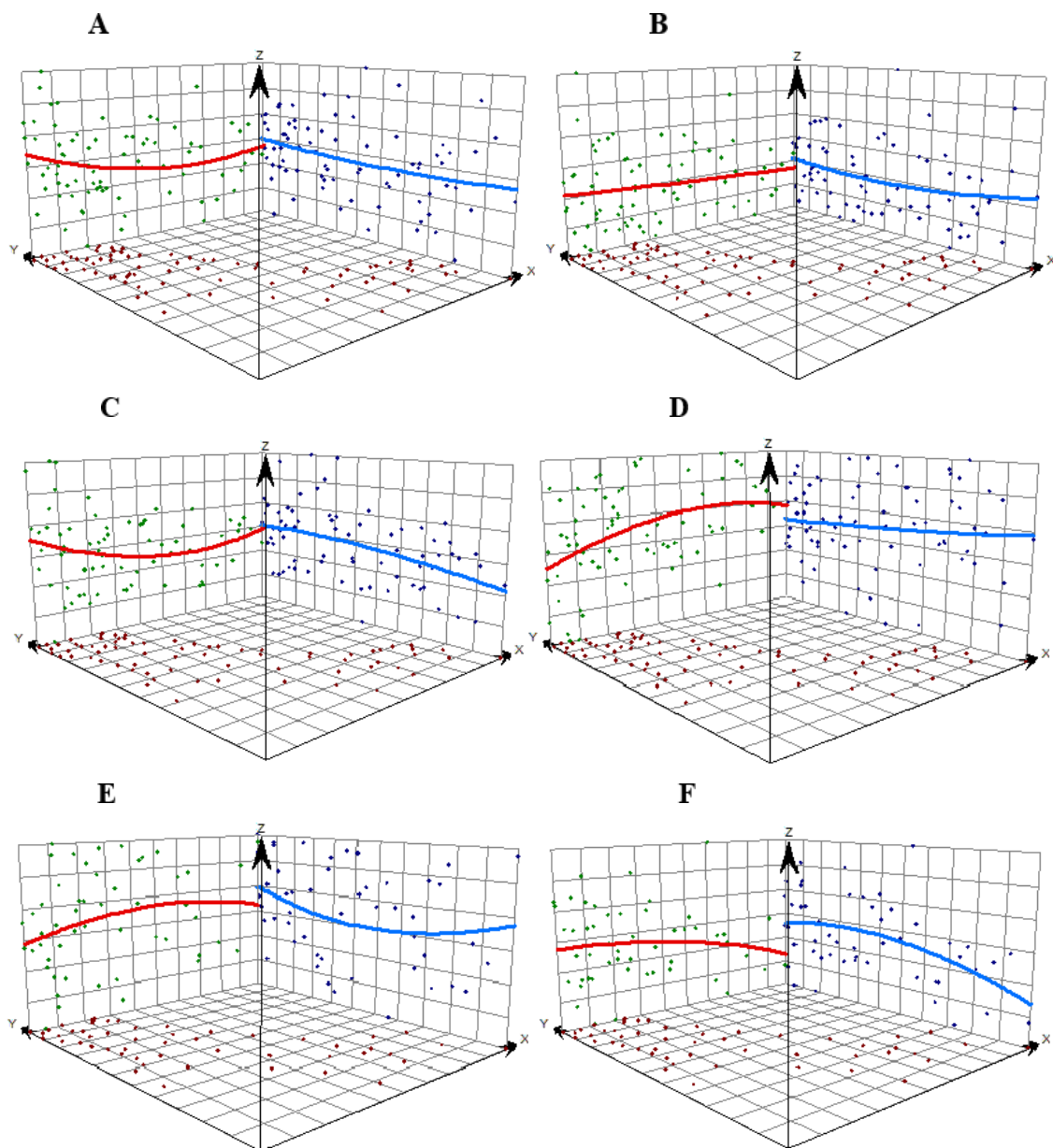
Tabla 8. Análisis de tendencia

Parámetro	Tendencia	
	XZ	YZ
Conductividad Hidráulica	Cuadrática	Cuadrática
Arena	Lineal	Cuadrática
Limo	Cuadrática	Cuadrática
Arcila	Cuadrática	Cuadrática
Densidad aparente	Cuadrática	Cuadrática
Densidad real	Cuadrática	Cuadrática
Porosidad	Cuadrática	Cuadrática
RP	Cuadrática	Cuadrática

XZ: relación Norte-peso de la variable, YZ: relación Este-peso de la variable

En el caso de K, se observa una relación cuadrática en el plano XZ, donde los datos exhiben una ligera tendencia al crecimiento de este a oeste. En el plano YZ, la tendencia repite, mostrando un leve aumento de sur a norte, seguido de una disminución de norte a sur. En cuanto al contenido de arena, se presenta una tendencia lineal en el plano XZ, con un crecimiento leve de este a oeste. En el plano YZ, presenta una curva estable de tendencia cuadrática. Para el contenido de limo, se evidencia una tendencia cuadrática en el plano XZ, con un alza de este a oeste, seguida de una disminución de oeste a este. En el plano YZ, la tendencia es cuadrática, con una disminución de norte a sur. En el caso del contenido de arcilla, se observa una tendencia cuadrática en el plano XZ y YZ, con un incremento de oeste a este y norte a sur respectivamente. Respecto a la DA, en el plano XZ se presenta una tendencia

cuadrática con una disminución de este a oeste, mientras que en el plano YZ la tendencia es cuadrática con un leve crecimiento de sur a norte. En lo que concierne a la DR, en el plano XZ se evidencia una tendencia cuadrática caracterizada por un incremento de esta a oeste. Por otro lado, en el plano YZ, la tendencia también es cuadrática, mostrando un sutil aumento de sur a norte. Para la PT se aprecia una tendencia cuadrática tanto en el plano XZ como en el YZ, manifestando un aumento de oeste a este en el primer caso y de norte a sur en el segundo. En relación con la RP, se observa una tendencia cuadrática en el plano XZ, caracterizada por un aumento de este a oeste, seguido de una disminución de oeste a este. Por otro lado, en el plano YZ, la tendencia también es cuadrática, presentando una disminución de norte a sur.



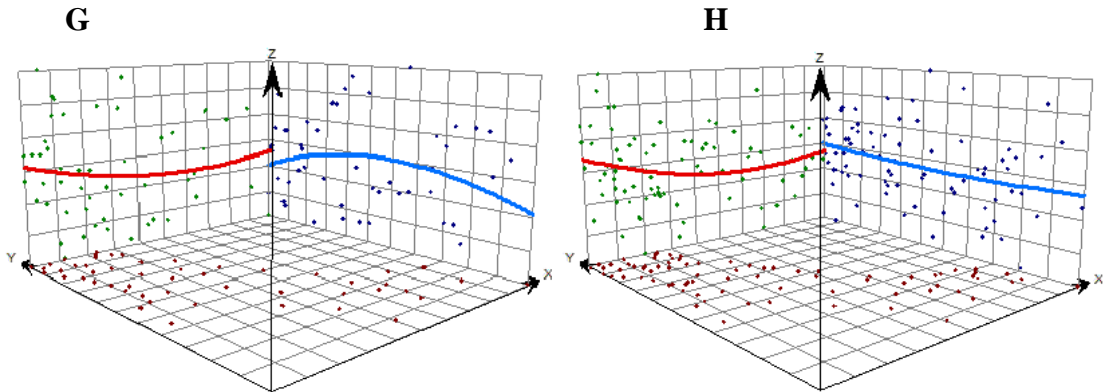
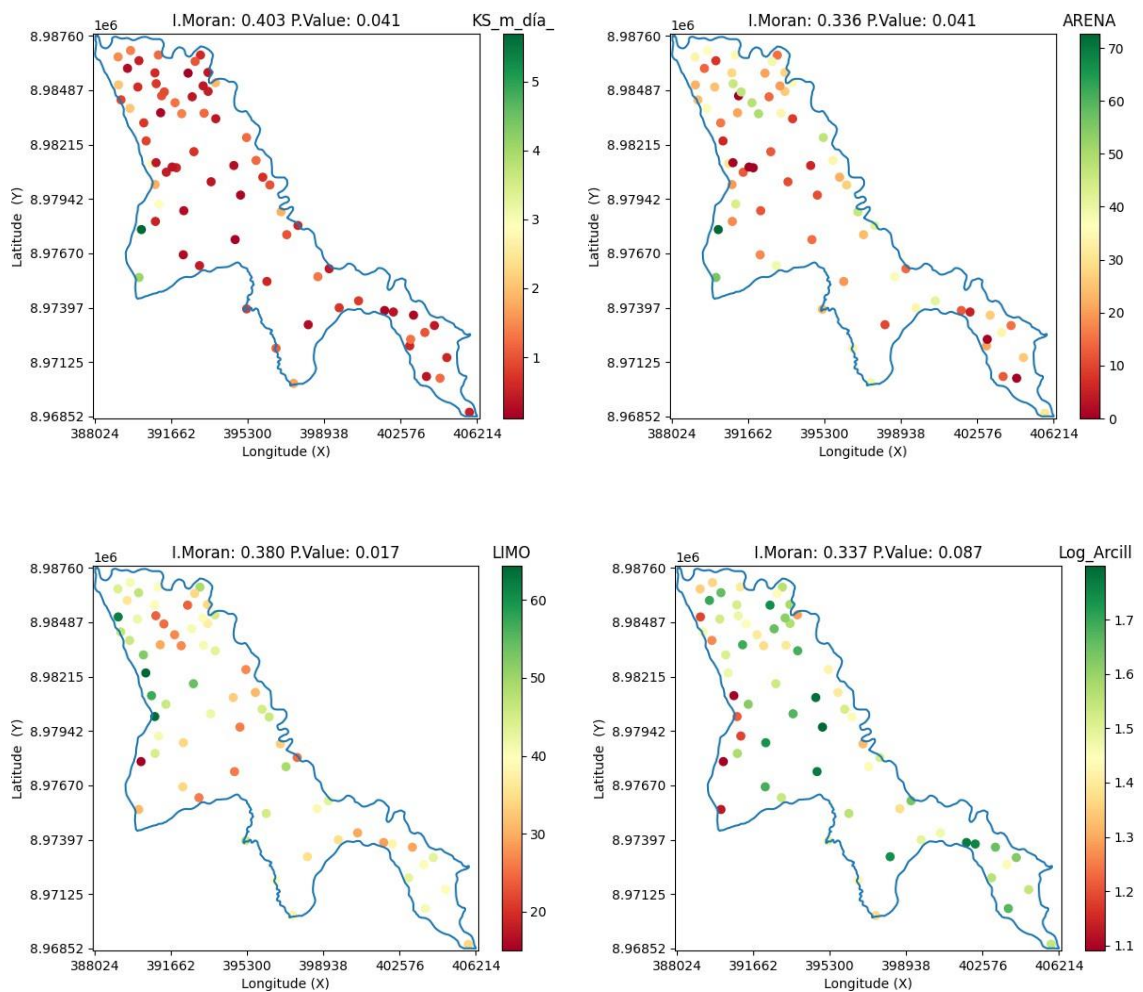


Figura 8. Gráficos de tendencia. A, conductividad hidráulica; B, arena; C, limo; D, arcilla; E, densidad aparente; F, densidad real; G, porosidad y H, resistencia mecánica a la penetración

4.2.2. Índice de Morán

En la **Figura 10** se presenta el análisis de autocorrelación a través del índice de Morán (IM).



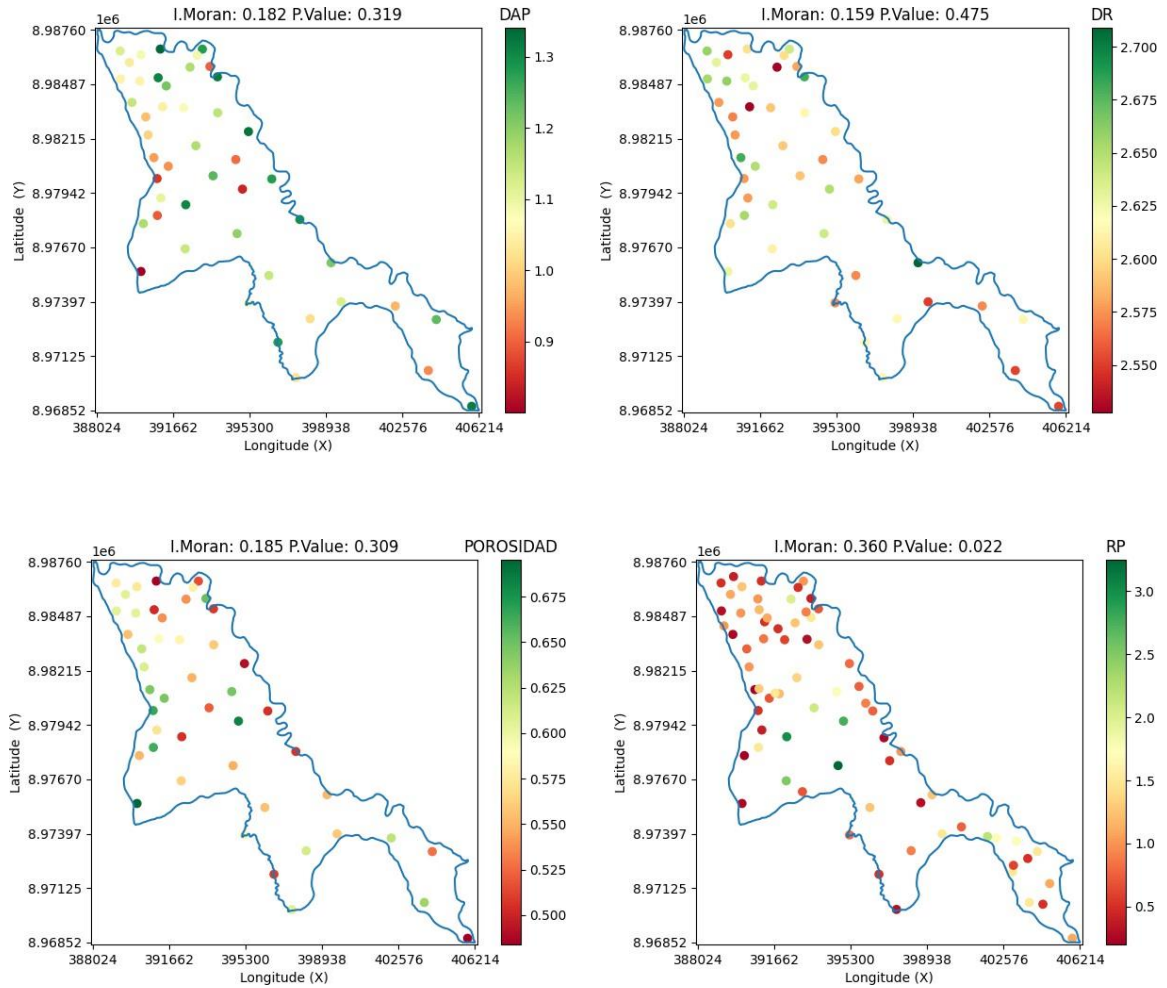


Figura 9. Test del Índice de Morán

En este contexto, el estadístico de prueba arroja un valor de 0,403 para la K, indicando la presencia de autocorrelación espacial positiva. Además, al considerar que el valor de P es menor a 0,05, se descarta la hipótesis nula que afirmaba la ausencia de autocorrelación y, con un nivel de confianza del 95%, se concluye que la K muestra autocorrelación espacial, lo que respalda la viabilidad de avanzar hacia la formulación de un modelo de distribución espacial.

En lo que respecta al contenido de arena, limo y los valores de RP, se observan IM de 0,336, 0,38 y 0,36 respectivamente, con valores de P inferiores a 0,05 en los tres casos; por lo tanto, se tiene la capacidad de rechazar la hipótesis nula, lo que implica que la distribución de los valores no sigue un proceso aleatorio. En consecuencia, se establece la existencia de una dependencia espacial en estos datos.

Por otra parte, a excepción del contenido de arcilla, los valores de la DA, DR y PT exhiben un IM bajo, siendo 0,182, 0,159 y 0,185 respectivamente. Según Balzarini (2014), estos valores apenas supera el umbral crítico de cero, indicando que los datos

pueden presentar una dispersión aleatoria en el espacio o que la distribución espacial no presenta un patrón definido. En este contexto, se llega a la conclusión de que no es apropiado desarrollar un modelo de distribución espacial para las variables mencionados.

4.3. Distribución espacial con KO

4.3.1. Parámetros de los modelos geoestadísticos de mejor ajuste

Se procedió a realizar el ajuste de los modelos de semivarianza correspondientes a cada variable, lo que señala la presencia de dependencia espacial. La **Tabla 9** exhibe los parámetros derivados de la estimación de los semivariogramas correspondientes a cada una de las variables utilizando Kriging Ordinario (KO).

Tabla 9. Análisis geoestadístico

Parámetro	Und.	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta (C+Co)	Rango (A)	GDE
Conductividad Hidráulica	m/día	Gaussiano	0,43	0,78	8546,34	0,55
Arena	%	Exponencial	48,45	141,23	1912,57	0,34
Limo	%	Esférico	49,37	74,88	4440,04	0,66
Arcila	%	EPP	-	-	-	-
Densidad aparente	g/cm ³	EPP	-	-	-	-
Densidad real	g/cm ³	EPP	-	-	-	-
Porosidad	%	EPP	-	-	-	-
RP	kg/cm ²	Circular	0,23	0,40	7009,90	0,57

EPP: Efecto pepita puro, GDE: grado de dependencia espacial, RP: resistencia mecánica a la penetración

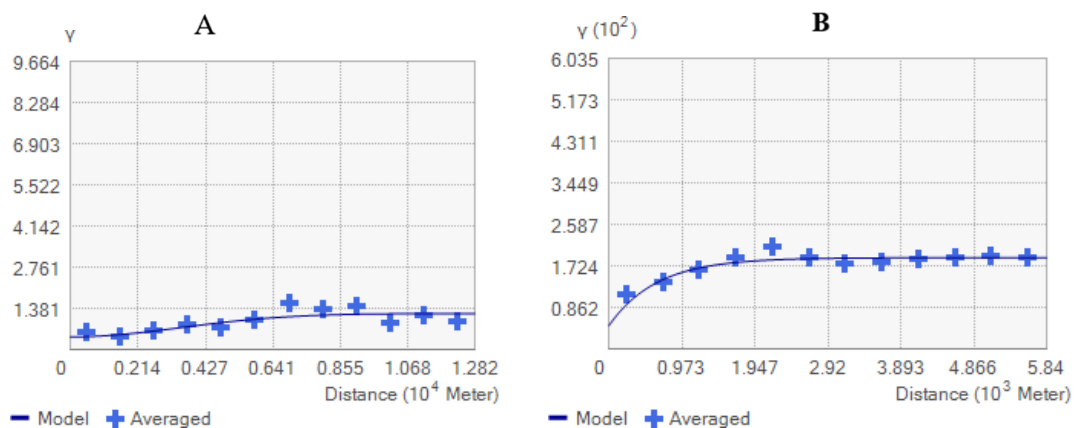
Los modelos geoestadísticos que presentaron mejor ajuste fueron: gaussiano para la K, exponencial para el contenido de arena, esférico para el limo y circular para la RP. Guatibonza et al. (2009) indicaron que la K presenta un mejor ajuste al modelo esférico, similar a lo reportado por Barrios & Florentino (2009). Con relación al contenido de arena y limo, se observaron similitudes con los hallazgos de Mogollón et al. (2012), indicando un mejor ajuste al modelo exponencial para el contenido de arena y al modelo esférico para el contenido de limo y la RP, difiriendo en esta última variable. Cada una de las variables exhibió de manera evidente un efecto pepita, indicando la existencia de una microvariabilidad que no ha sido explicada por el método de muestreo empleado, según lo señalado por Arrouays et al. (2000). Esta discrepancia puede atribuirse al patrón de dispersión de los puntos y las particularidades de los sitios de muestreo.

En la **Tabla 9**, también se aprecia los valores del efecto pepita (Co), meseta (C+Co), rango (A) y grado de dependencia espacial (GDE) para la K, contenido de

arena, limo y RP. El efecto pepita refleja la variabilidad entre puntos de muestreo adyacentes y debería aproximarse a cero para garantizar una correlación espacial adecuada (Jaramillo, 2012). Se obtuvieron valores de 0,43 y 0,23 para K y RP respectivamente, mientras que, para el contenido de arena y limo, se observaron valores elevados, posiblemente asociados a la variabilidad in situ o a errores instrumentales.

El Rango indica la extensión de la correlación hasta una distancia en la cual la semivarianza se estabiliza, indicando el punto en el cual la variable deja de exhibir autocorrelación al alcanzar la meseta. Los rangos variaron de 1912,57 m para la arena, hasta 8546.34 m para la K, mientras que para el contenido de limo y RP fue 4440,04 m y 7009,90 m respectivamente. Déleg (2018) afirma que tener rangos altos garantiza un mejor modelo de distribución espacial. Sin embargo, Mogollón et al. (2012), reportó rangos de 1227,90 m, 293,40 m, 37,10 m y 114,90 m para K, arena, limo y RP respectivamente, argumentando que para obtener rangos más bajos es necesario incrementar los puntos de muestreo en el área de estudio. Según la clasificación de Cambardella & Karlen (1999), las dependencias espaciales (Co/C+Co) para todos los semivariogramas fueron moderadas (0,25-0,75).

El contenido de arcilla, DA, DR y PT exhiben un efecto pepita puro o independencia espacial tal como se muestra en la **Figura 10**. Esto indica que, en el área de estudio, estas variables no muestran ninguna correlación entre los puntos de muestreo. En otras palabras, el valor medido en un punto de la malla no tiene relación espacial con los puntos cercanos y se comporta de manera aleatoria. Esta falta de autocorrelación podría atribuirse al hecho de que las partículas más grandes, como el limo y la arena, son menos propensas a trasladarse de un punto a otro, mientras que la arcilla, al tener un tamaño menor, puede trasladarse más fácilmente tanto en el perfil del suelo como espacialmente (Guatibonza et al., 2009). Además, la variación espacial de estos parámetros se ve afectada por una amalgama de factores físicos, químicos y biológicos que inciden en la composición y estructura del suelo en diversas ubicaciones.



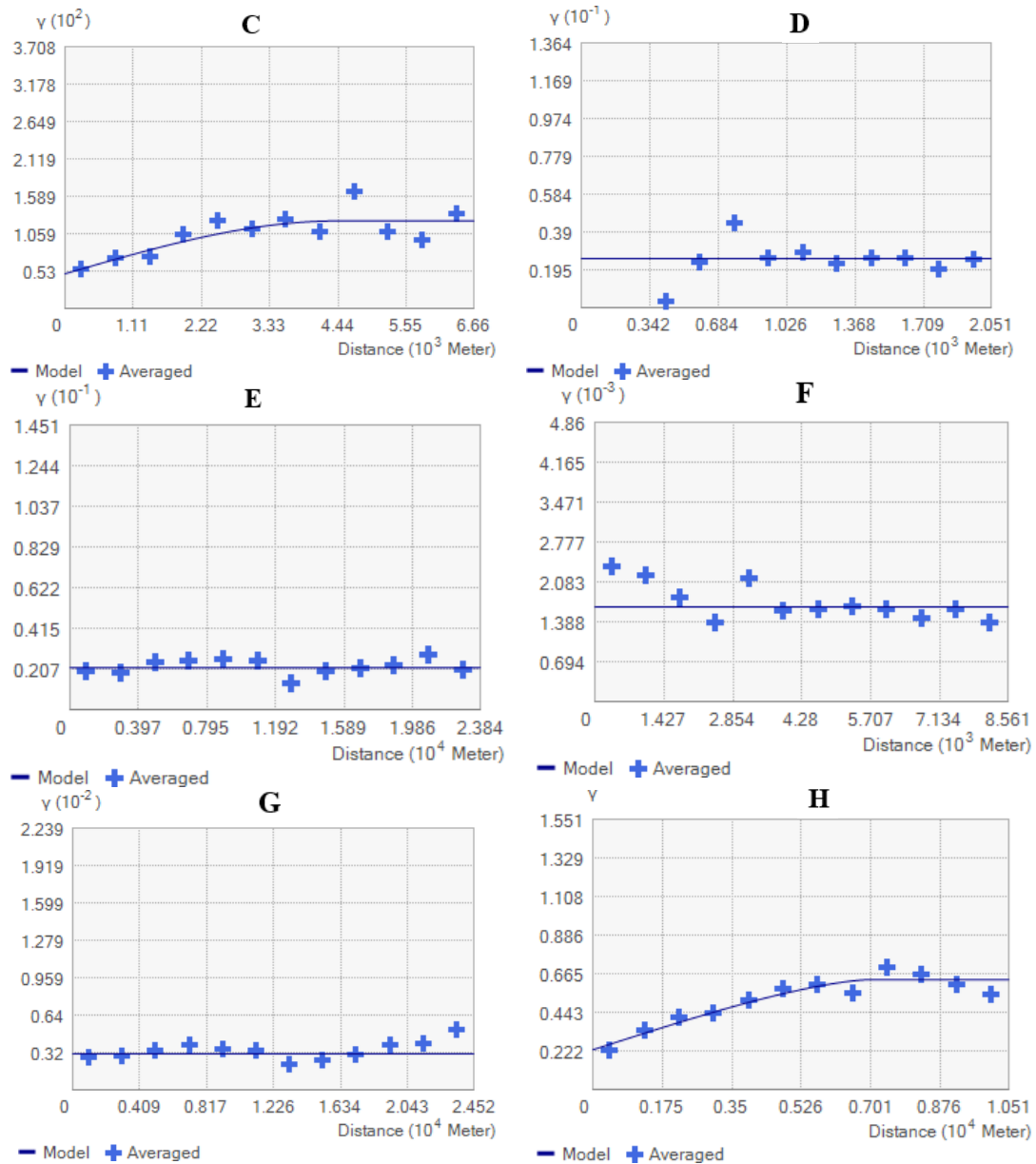


Figura 10. Semivariogramas. A, conductividad hidráulica; B, arena; C, limo; D, arcilla E, densidad aparente; F, densidad real; G, porosidad; H, resistencia mecánica a la penetración

4.3.2. Distribución espacial de la conductividad hidráulica

En la **Figura 11** se muestra el mapa de distribución espacial de la K para el área de estudio y los valores predichos mediante KO estuvo en un rango de 0,30 m/día a 3,64 m/día, variando de bajo a moderado (Villón, 2007). En las regiones oeste, noroeste y este del área en cuestión, se observaron los valores más elevados para la conductividad hidráulica (K), oscilando entre 1,09 y 3,64 m/día; este fenómeno se atribuye a la presencia de un mayor porcentaje de arena. Contrariamente, las tasas más bajas se registran en la porción suroeste y central del mapa, donde varían entre 0,41 y 0,60 m/día.

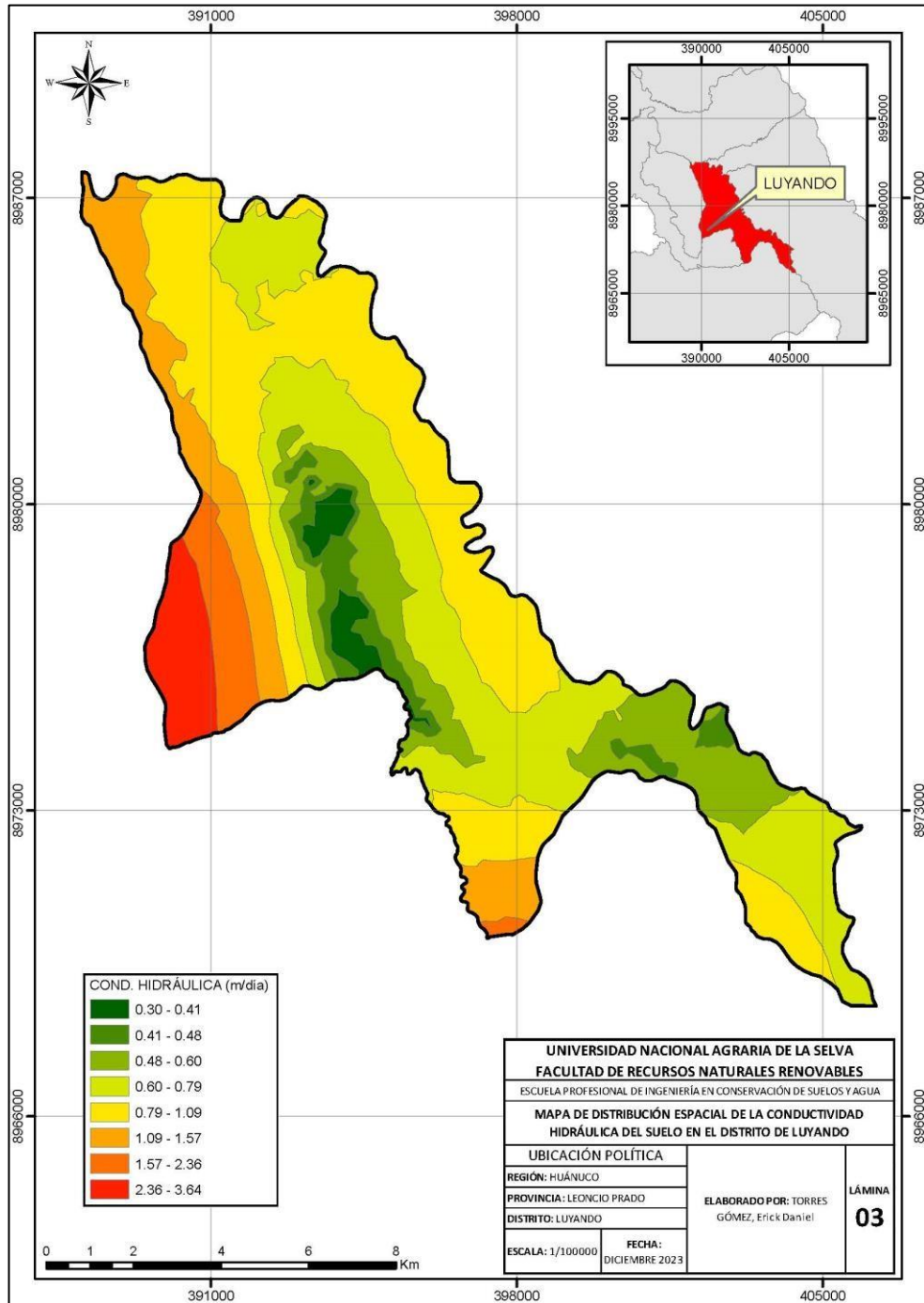


Figura 11. Distribución espacial de la conductividad hidráulica (K)

4.3.3. Distribución espacial de las propiedades físicas del suelo

4.3.3.1. Distribución espacial de los niveles de arena

El la **Figura 12** se muestra el mapa de distribución espacial del contenido de arena para el área de estudio y los valores predichos mediante KO estuvo en un rango de 13,43% a 47,29%. Los valores más altos se presentaron hacia el oeste del mapa, con 38,82% a 47,28%; los valores más bajos estuvieron en la parte céntrica del área de estudio, con 13,42% a 17,65%.

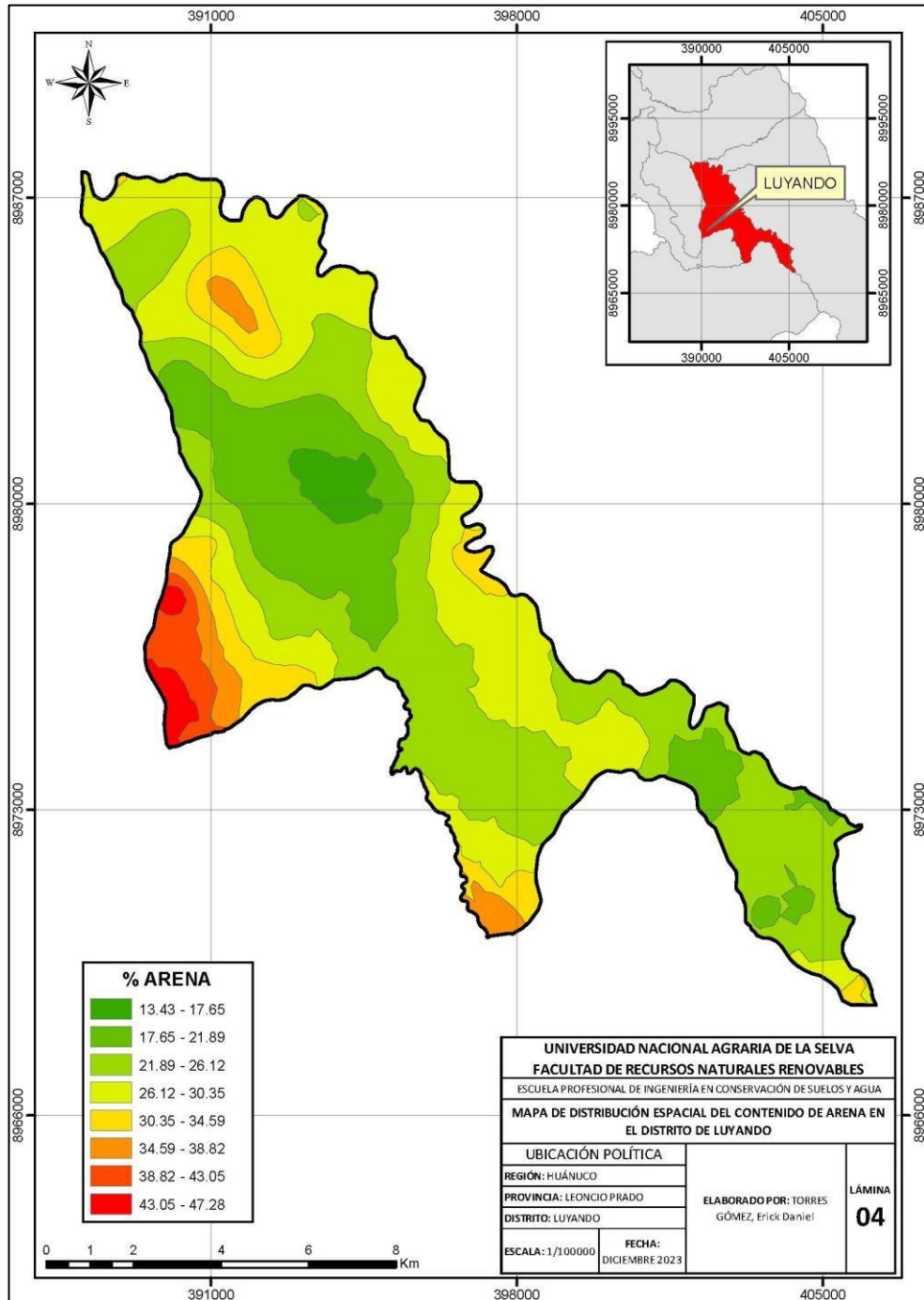


Figura 12. Distribución espacial del contenido de arena

4.3.3.2. Distribución espacial de los niveles de limo

En la **Figura 13** se muestra el mapa de distribución espacial del contenido de limo para el área de estudio y los valores predichos mediante KO estuvo en un rango de 27,35% a 58,22%. Los valores más altos se presentaron hacia el oeste del mapa, con 48,87% a 58,22%; los valores más bajos estuvieron en norte y suroeste, con 27,35% a 30,44%.

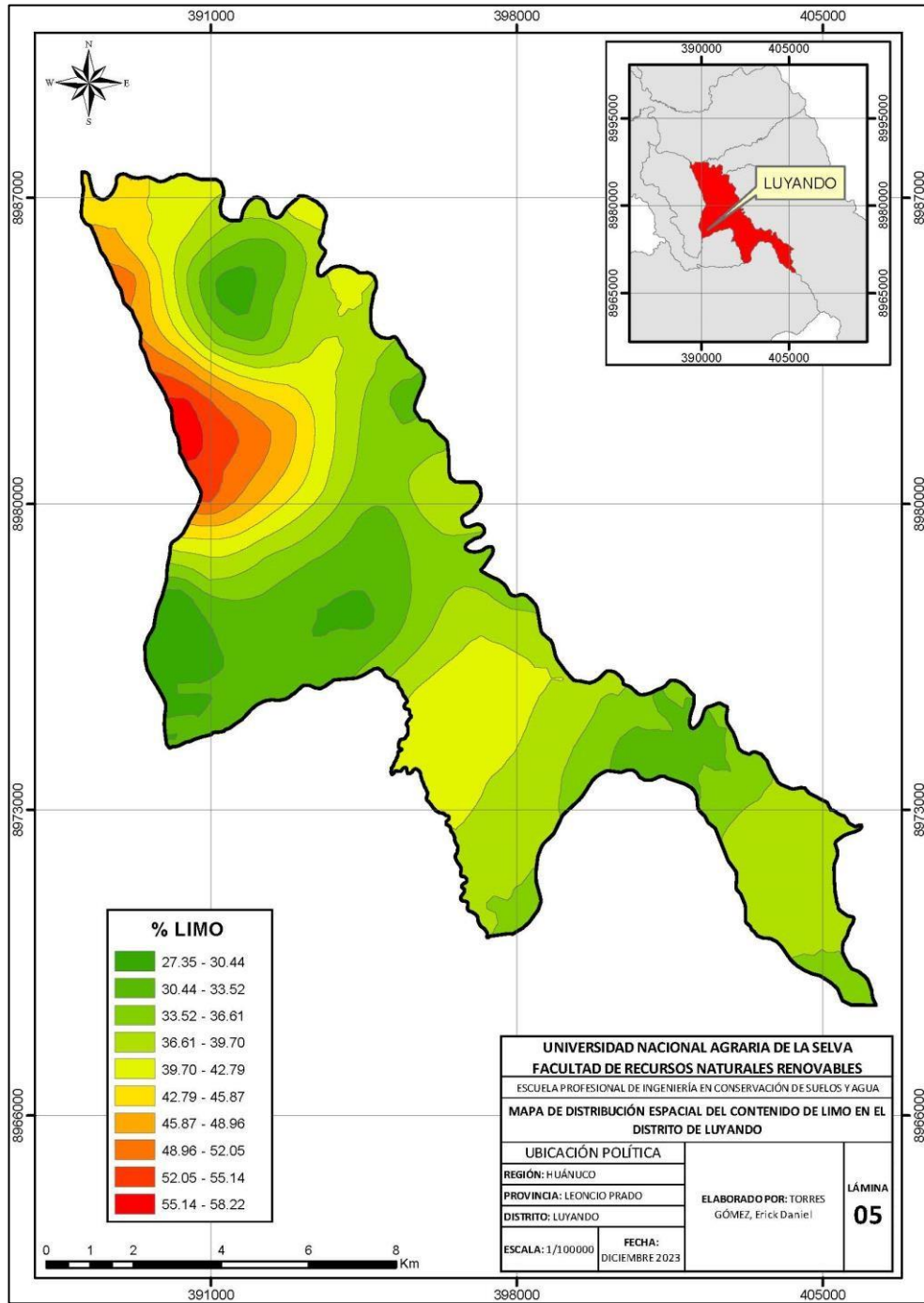


Figura 13. Distribución espacial del contenido de limo

4.3.3.3. Distribución espacial de la resistencia mecánica a la penetración

En la **Figura 14** se muestra el mapa de distribución espacial de la RP para el área de estudio y los valores predichos mediante KO estuvo en un rango de $0,46 \text{ kg/cm}^2$ a $2,39 \text{ kg/cm}^2$. Los valores más altos se presentaron en la zona céntrica del mapa, con $1,73 \text{ kg/cm}^2$ a $2,39 \text{ kg/cm}^2$, debido al incremento de la proporción de arcilla en esta zona. Los valores más bajos estuvieron en sur y oeste, con $0,46 \text{ kg/cm}^2$ a $0,71 \text{ kg/cm}^2$; en estos lugares

se reportó una mayor proporción de arena presentando una consistencia más friable y debido a su tamaño no logran formar agregados con una estructura estable.

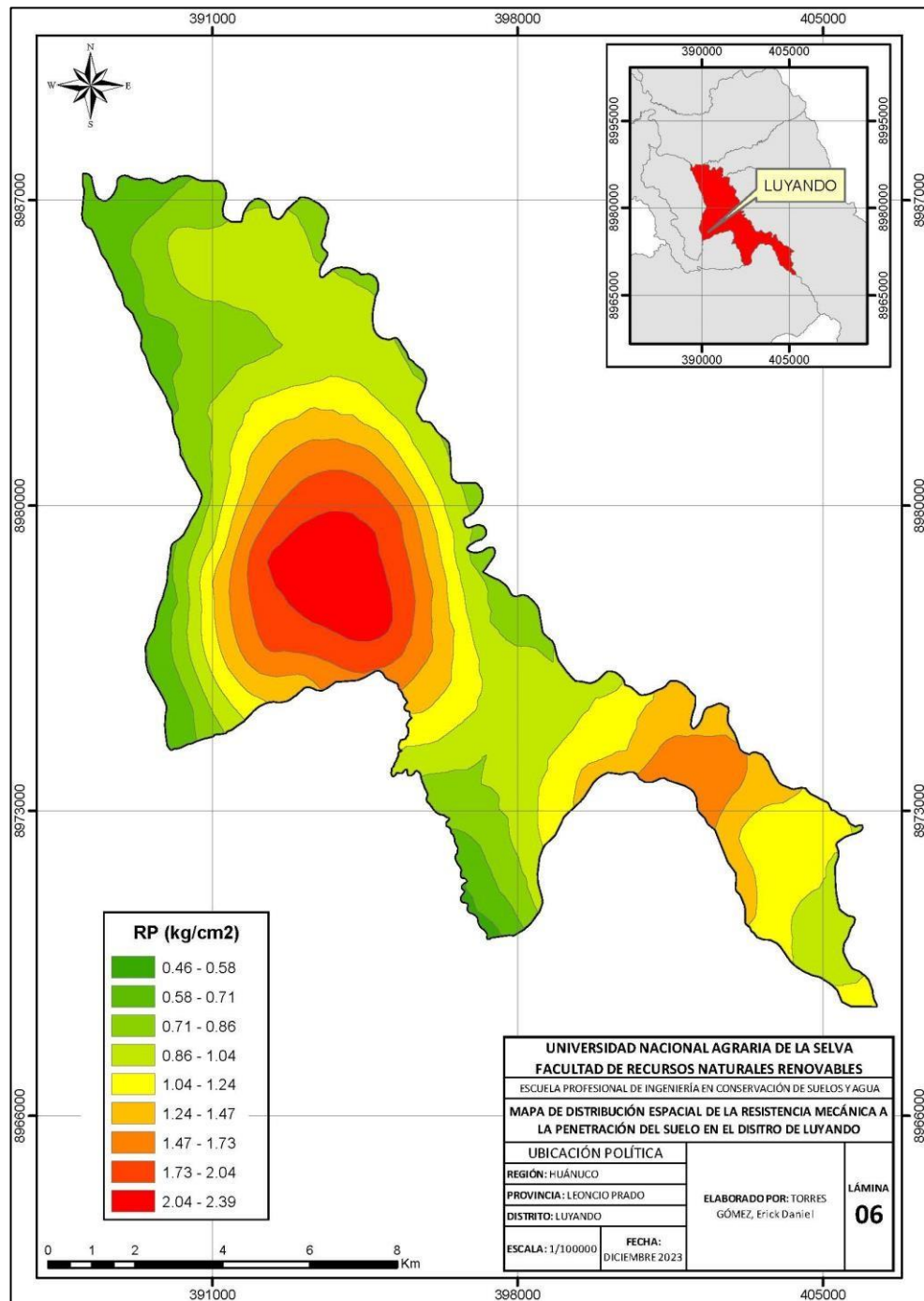


Figura 14. Distribución espacial de la RP

4.4. Correlación de Pearson

En la **Tabla 10** se observa la correlación existente entre las propiedades del suelo según el criterio establecido por Hernández et al. (2014). La K presentó correlación positiva considerable (0,72) con el contenido de arena y correlación negativa considerable (-0,76) con el contenido de arcilla; se debe a que los suelos con mayor contenido de arena tienden a tener

una K más alta ya que las partículas de arena son más grandes y proporcionan poros de gran tamaño permitiendo un mayor flujo de agua entre ellas. Por otro lado, la arcilla tiene partículas más pequeñas y tiende a compactarse, lo que puede reducir la K al disminuir la capacidad de los poros para permitir el flujo del agua (Villón, 2007). La combinación específica de estos componentes texturales en un suelo determinado dará lugar a una correlación única entre el contenido de arena, arcilla y la K. Además, otros factores como la materia orgánica, la estructura del suelo y la presencia de sales también pueden influir en esta relación.

Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson

Parámetros	K	Arena	Limo	Arcilla	DA	DR	PT	RP
K	1,00	0,72	-0,02	-0,76	-0,06	0,16	0,08	-0,59
Arena		1,00	-0,45	-0,73	0,23	0,09	-0,22	-0,56
Limo			1,00	-0,27	-0,11	0,14	0,13	-0,29
Arcilla				1,00	-0,16	-0,20	0,14	0,82
DA					1,00	0,12	-0,26	-0,01
DR						1,00	0,00	-0,08
PT							1,00	0,00
RP								1,00

K: conductividad hidráulica, DA: densidad aparente, DR: densidad real, PT: porosidad, RP: resistencia mecánica a la penetración

La K y la RP exhibieron una correlación negativa media de -0,59. Los valores bajos de RP se asociaron con mayores concentraciones de contenido de arena en los puntos de muestreo, como se evidencia en la **Tabla 10**, que muestra una correlación negativa media (-0,56) entre ambos parámetros, impactando positivamente en la K. En general, la relación entre la K y la RP varía según las condiciones específicas del suelo y la gestión del mismo. Un suelo con buena estructura y manejo adecuado puede tener una K mejorada y una RP reducida, pero esta relación puede ser afectada por cambios en la textura, contenido de agua y compactación. Por otro lado, la RP mostró una correlación positiva considerable de 0,82 con el contenido de arcilla, indicando que, en presencia de un alto contenido de arcilla, se obtendrán valores elevados de RP, y consecuentemente, la K disminuirá. Otros coeficientes de correlación significativos se encontraron entre la arena y limo (-0,45), arena y arcilla (-0,73), limo y arcilla (-0,27), limo y RP (-0,29).

V. CONCLUSIONES

- 1) Se determinó la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo: textura, PT, DA, DR y RP. La conductividad hidráulica varió entre lenta y moderada; la textura presento valores medios de 26,87%, 38,21% y 34,78% para la arena, limo y arcilla respectivamente; los valores de DA fueron característicos de suelos esponjosos y campo labrado muy compactado; la DR fue propio de suelos de horizontes minerales; la PT varió entre bajo, satisfactorio y excelente; la RP varió entre suelos muy suaves y suelos muy duros. Los CV fueron bajos para la DA, DR y PT, moderadamente bajo para el contenido de limo y arcilla, moderada para la arena, moderadamente alta para la RP y muy alta para la conductividad hidráulica.
- 2) El análisis de correlación espacial indicó que la conductividad hidráulica, contenido de arena, limo y arcilla, DA, DR, PT y RP siguen una tendencia espacial cuadrática en el plano YZ al igual que en el plano XZ, exceptuando al contenido de arena que sigue una tendencia lineal. Asimismo, las variables conductividad hidráulica, arena, limo y RP presentaron una adecuada autocorrelación espacial permitiendo desarrollar un modelo de distribución espacial, mientras que la arcilla, DA, DR y PT mostraron una distribución aleatoria de sus datos.
- 3) La distribución espacial de la conductividad hidráulica, arena, limo y RP presentaron mejor ajuste al modelo geoestadístico gaussiano, exponencial, esférico y circular respectivamente con dependencia espacial moderada (GDE), mientras que el contenido de arcilla, DA, DR y PT mostraron efecto pepita puro o independencia espacial. El rango de los semivariogramas fue: 8546,34 m para conductividad hidráulica, 1912,57 m para el contenido de arena, 4440,04 m para el contenido de limo y 7009,90 m para RP.
- 4) La conductividad hidráulica se correlacionó positivamente con el contenido de arena, pero presento correlación negativa considerable con el contenido de arcilla y correlación negativa media con la RP, no mostró correlación significativa con el contenido de limo, DA y PT.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- 1) Utilizar la herramienta de la geoestadística para para la gestión del territorio e identificar zonas aptas para la agricultura u otra actividad de aprovechamiento o conservación.
- 2) Implementar más puntos de muestreo en el área de estudio para mejorar la eficiencia de predicción en áreas no muestreadas utilizando diversos métodos de interpolación y modelos geoestadísticos.
- 3) Utilizar el mapa de distribución espacial de la conductividad hidráulica para el desarrollo de sistemas de drenaje agrícola en áreas que lo requieran dentro del distrito de Luyando.
- 4) Crear un visor en línea través de la herramienta ArcGIS Online para mejorar el acceso a la información y también se pueda adicionar datos de futuras investigaciones dentro del distrito de Luyando para mantener la data actualizada.

VII. REFERENCIAS

- Agostini, M. et al. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ciencia del Suelo*, 32(2), 171-176.
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/2445>
- Arrouays, D., et al. (2000). Short-Range spatial variability of metal content in soil on a one hectare agricultural plot. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31(), 387-400.
<https://doi.org/10.1080/00103620009370444>
- Balzarini, M. (2014). Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de buenas prácticas.
- Barrios, R. & Florentino, A. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 912-924.
<http://saber.udo.edu.ve/index.php/udoagricola/article/view/3185/24792740>
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18(), 11-31.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383239099001>
- Cambardella, C.A. & Karlen, D.L. (1999). Spatial Analysis of Soil Fertility Parameters. *Precision Agriculture* 1, 5–14. <https://doi.org/10.1023/A:1009925919134>
- Curay, C. (2018). Distribución espacial de la conductividad hídrica en el campus CEASA. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC.
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8448>
- Deb, S. K. & Shukla, M. K. (2012). Variability of Hydraulic Conductivity Due to Multiple Factors. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(5), 489-502.
<https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.489.502>
- Déleg, X. (2018). Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio UCUENCA. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30227>
- Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). (2017). Soil Survey Manual. Soil Science Division Staff.
- Díaz, M. A. (2002). Geoestadística Aplicada.
- Eras, R. (2020). Estimación de las relaciones espaciales entre la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo en el cultivo de banano. [Tesis Pregrado, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio UTMACH.
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/15539/1/TTUACA-2020-IA->

DE00007.pdf

- Ferreira, A. (2005). Técnicas de interpolación espacial utilizadas en la evaluación de reservas geológicas. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. Repositorio PUCV. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-1500/UCH1803_01.pdf
- Giraldo, R. (2002). Introducción a la Geoestadística. Geoinnova.
- Gobierno Regional de Huánuco (GOREHCO). (2016). Zonificación Ecológica y Económica. Suelos y Capacidad de Uso Mayor. Leoncio Prado.
- Guatibonza, M., Álvarez, J. G. & Sanabria, J. E. (2009). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tunguavita (Paipa, Colombia). *Agronomía Colombiana* 27(2), 261-271. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120996520090002000
- Gonzalez, J., Guerra F. & Gómez, H. (2007). Conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencias de la tierra: manejo y aplicación. *Geoenseñanza*, 12(1), 91-90. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36014577008>
- Gumiere, S. J. (2014). Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: Characterisation and spatial interpolation methods. *Biosystems Engineering*, 128, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.002>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación (6.ª ed.). Mc Graw Hill Education.
- Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19670604180>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). (2009). Mapa de Suelos del Perú.
- Jiménez, J., Puentes, H. & Leiva, F. R. (1992). Efectos de tratamientos de labranza sobre la resistencia a la penetración de un Andisol. *Agronomía Colombiana*, 9(1), 30-39. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1230>
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 1(1), 73-87. <https://www.semanticscholar.org/paper>
- Jaramillo J., Daniel F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147701>
- Kaúrichev, I. S. (1984). Prácticas de edafología. <https://www.elsolucionario.org/practicar-de-edafologia-i-s-kaurichev-1ra-edicion/>
- Lozano, Z., et al. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16(1), 61-72.

- https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612004000100009
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58 (), 1246-1266. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
- Martínez, A. & Ramírez, J. (2005). Desarrollo actual de la geoestadística en el mundo. *Minería y Geología*, 21(4). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223516052001>
- Melo, C. E. (2012). Análisis Geoestadístico Espacio Tiempo Basado en Distancias y Splines con Aplicaciones. [Tesis Posgrado, Universidad Nacional de Barcelona]. Repositorio UB. <https://diposit.ub.edu>
- Mestas, R. M. (2010). Variabilidad espacial de los atributos físico-hídricos del suelo y de la productividad del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L) irrigado bajo un sistema de siembra directa. *Revista De Ciências Agrárias*, 33(1), 307-313. <https://doi.org/10.19084/rca.15840>
- Mogollón, M., et al. (2012). Análisis espacial de atributos hidrofísicos en suelos con diferente uso. X Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2012, XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2012. DOI:10.13140/RG.2.1.4673.7442.
- Moreno, F., F. Cabrera, J. Fernández e I. Girón. 2001. Propiedades hidráulicas y concentración de metales pesados en los suelos y en las aguas de drenaje de dos zonas afectadas por el vertido. *Bol. Geol. Minero* 112, 178-184. <https://www.researchgate.net>
- Olaya V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf.
- Paz, G.A. et al. (2001). Variabilidad espacial de la infiltración en una ladera determinada con permeámetro de Guelph e infiltrómetro de tensión. *Zona no Saturada*, 5(). https://abe.ufl.edu/faculty/carpenna/files/pdf/zona_no_saturada/temas_de_investigacion_v5/12.pdf
- Pedro, C. (2003). Use of a Combined Penetrometer-TDR Moisture Probe for Soil Compaction Studies. *College on Soil Physics*, 21(3), 450-457. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/100/38100129.pdf
- Pelegrín, F. (1996). Influencia del sistema de laboreo en la resistencia a la penetración y otras propiedades físicas del suelo. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales*, 11(3), 409-425. <http://hdl.handle.net/10261/64880>
- Porta, J., et al. (2003). Edafología. (3.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa
- Ramírez, L, et al., (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colômbia. *Enghenaria Agrícola*, 28(1).

<https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100006>

- Rodríguez, J. & Olivella, R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*.
- Rodríguez, A. 2004. *Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]
- Rubio, A. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del parque natural Los Alcornocales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio CSIC. <https://digital.csic.es/handle/10261/57951>
- RucK, L. (2014) *Propiedades Físicas del Suelo*. <https://bibliofagro.pbworK.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Salamanca, A. & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*, 56(4), 381-397. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056\(04\)381-397.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056(04)381-397.pdf)
- Sarría, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2017). *Atlas de Zonas de Vida del Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-9.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2020). *Climas del Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Usowicz, B. & Lipiec, J. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its link with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, 11(8293). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>
- Villón, M. (2007). *Drenaje*. <https://book.google.com.pe/book?id=d9OGAQAACAAJ>
- Warrick, A.W. & Nielsen, D.R. (1980). *Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field*. In: Hillel, D., Ed., *Applications of Soil Physics*, Academic Press, New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>
- Webster, R. & Oñover, M. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 315 p.
- Zavaleta, A. (1992). *Edafología: El suelo en relación con la Producción*. <https://book.google.com.pe/book?id=UsbwGwAACAAJ>

ANEXOS



Figura 15. Georreferenciación de los puntos de muestreo



Figura 16. Recolección de muestras para densidad aparente



Figura 17. Recolección de muestras para conductividad hidráulica



Figura 18. Pesado de muestras



Figura 19. Preparación de muestras para conductividad hidráulica



Figura 20. Tamizado de las muestras

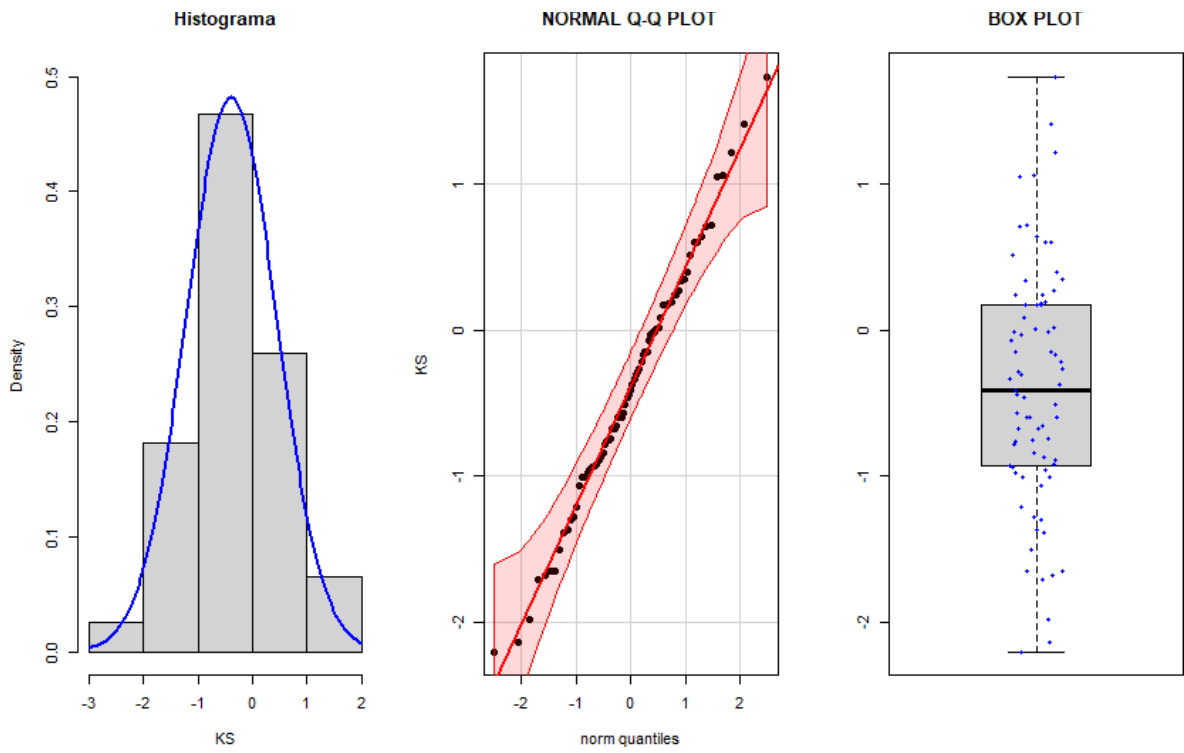


Figura 21. Gráficos descriptivos de la conductividad hidráulica

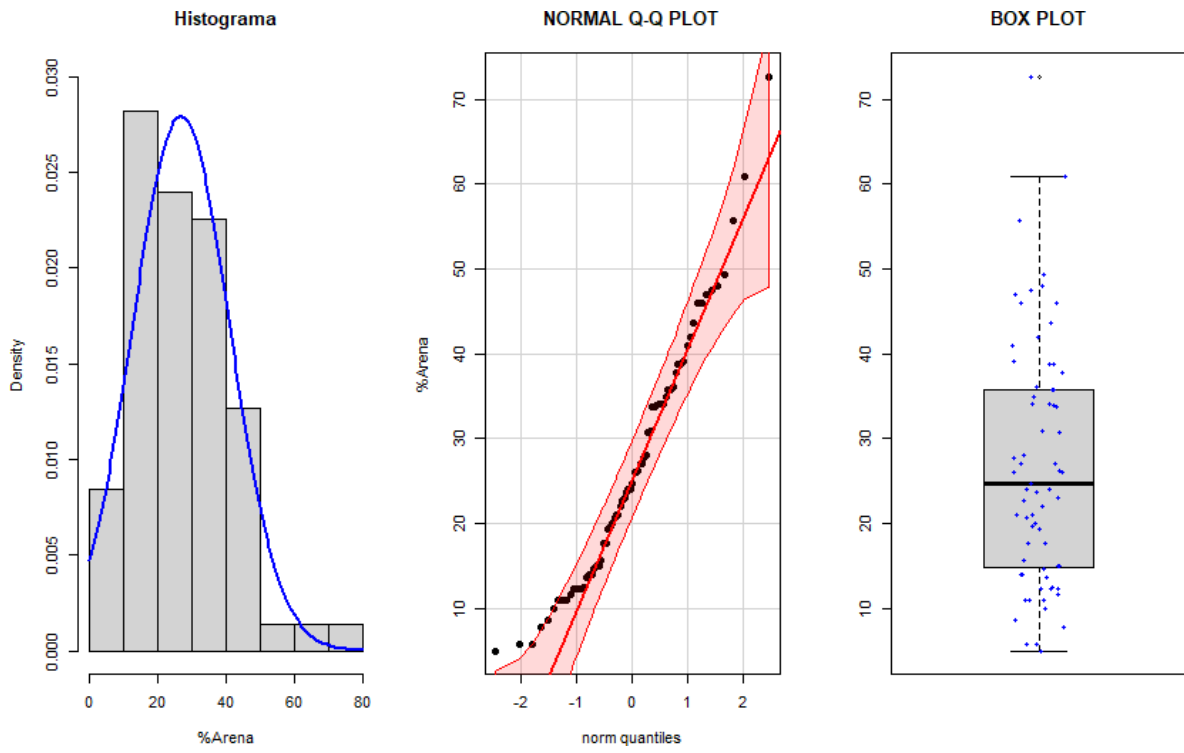


Figura 22. Gráficos descriptivos del contenido de arena

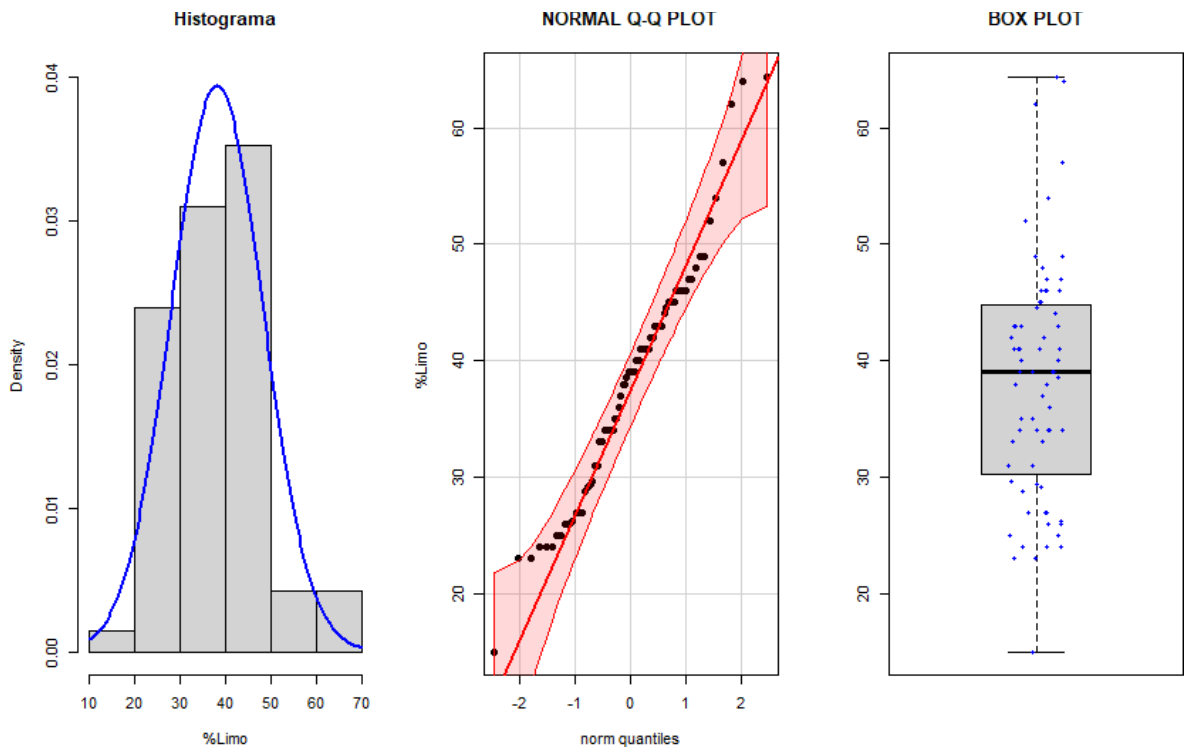


Figura 23. Gráficos descriptivos del contenido de limo

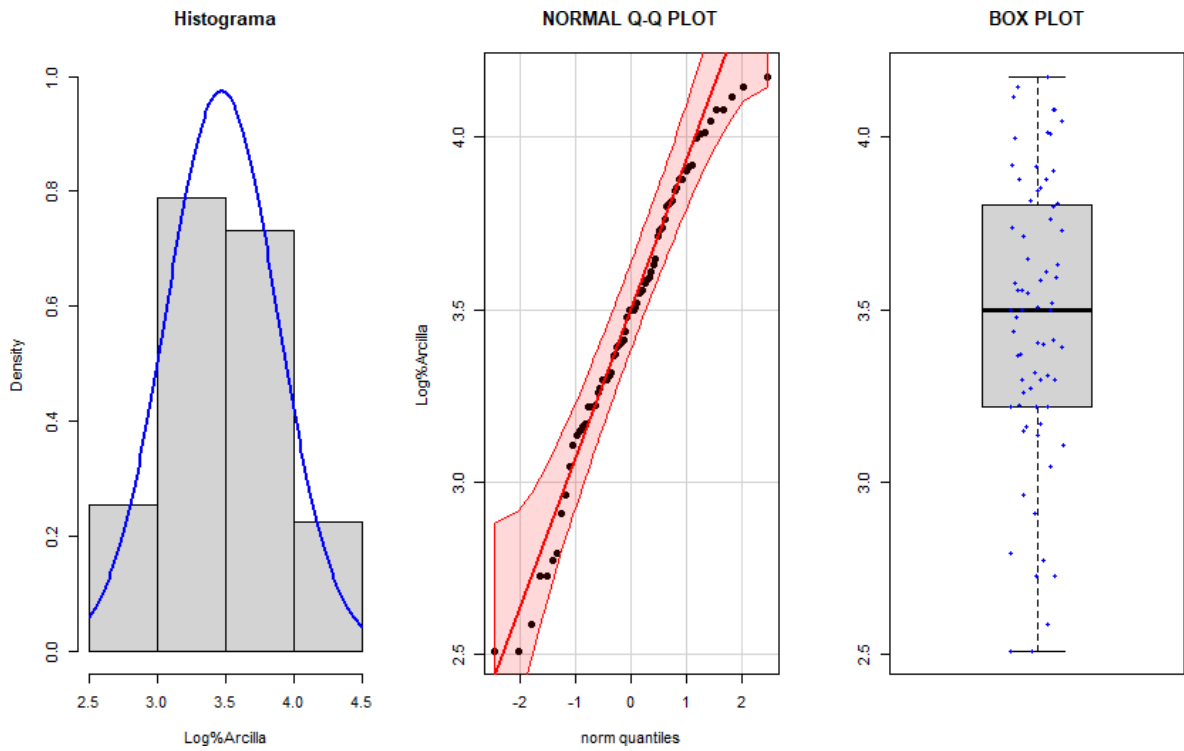


Figura 24. Gráficos descriptivos del contenido de arcilla

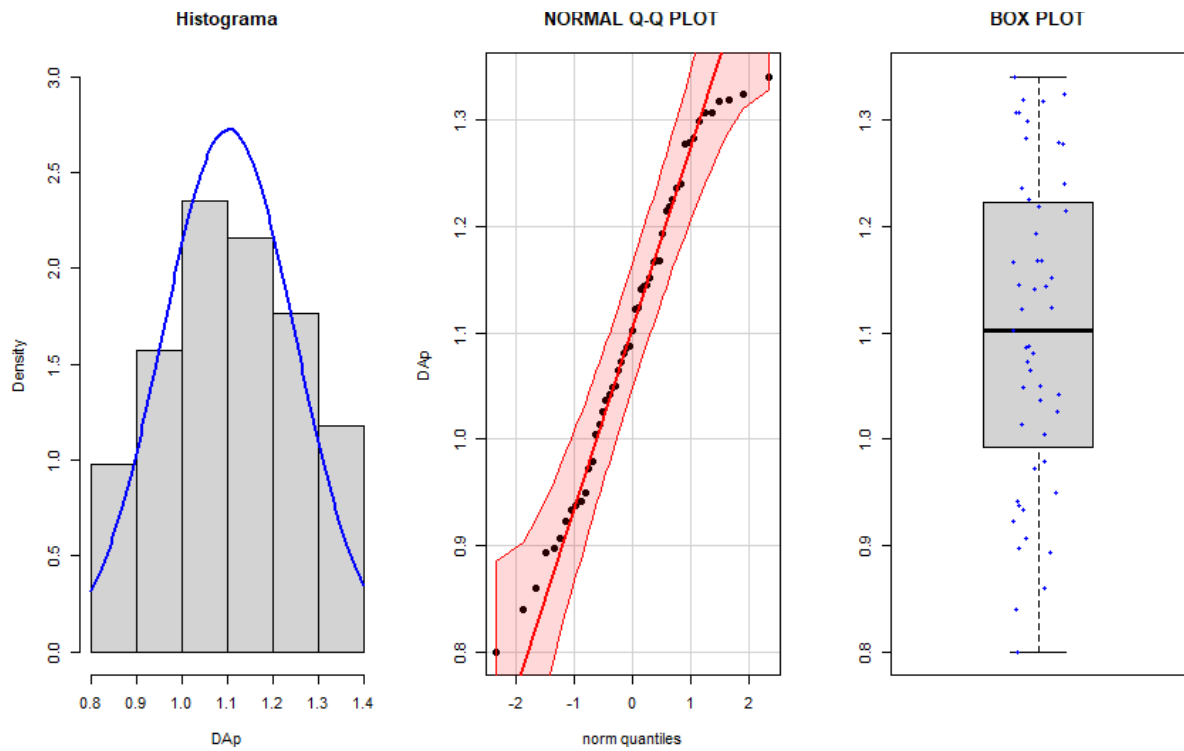


Figura 25. Gráficos descriptivos de la densidad aparente

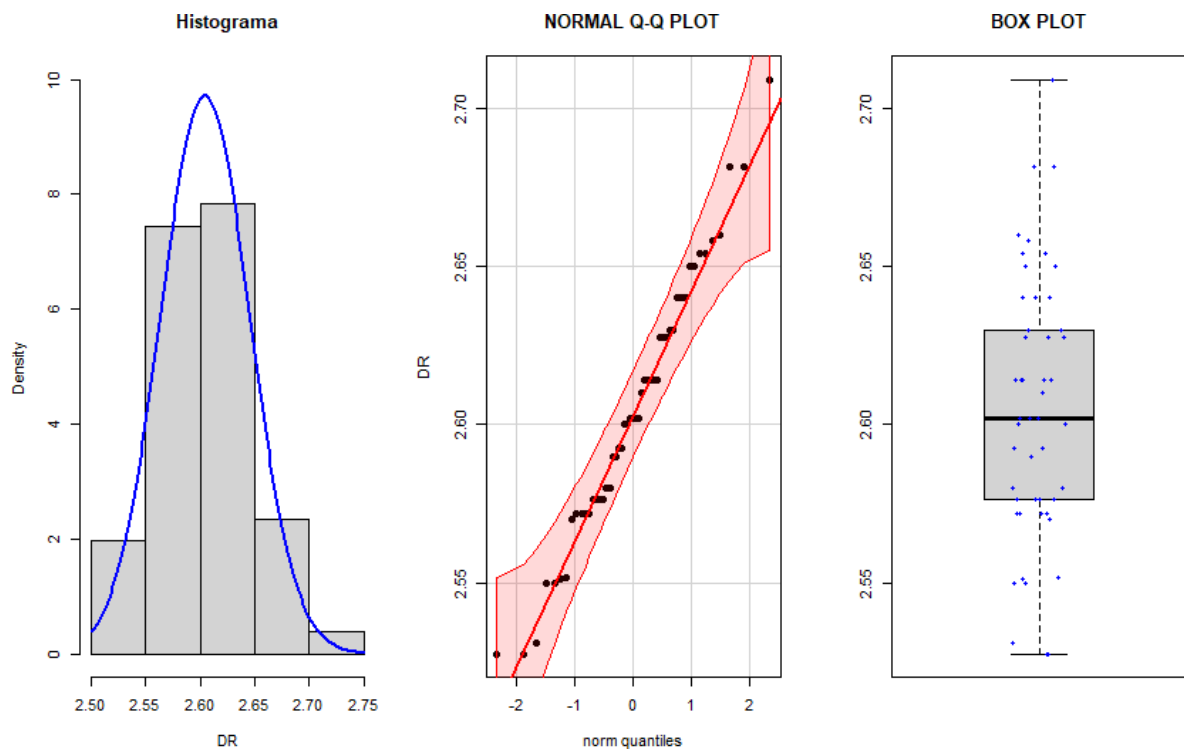


Figura 26. Gráficos descriptivos de la densidad real

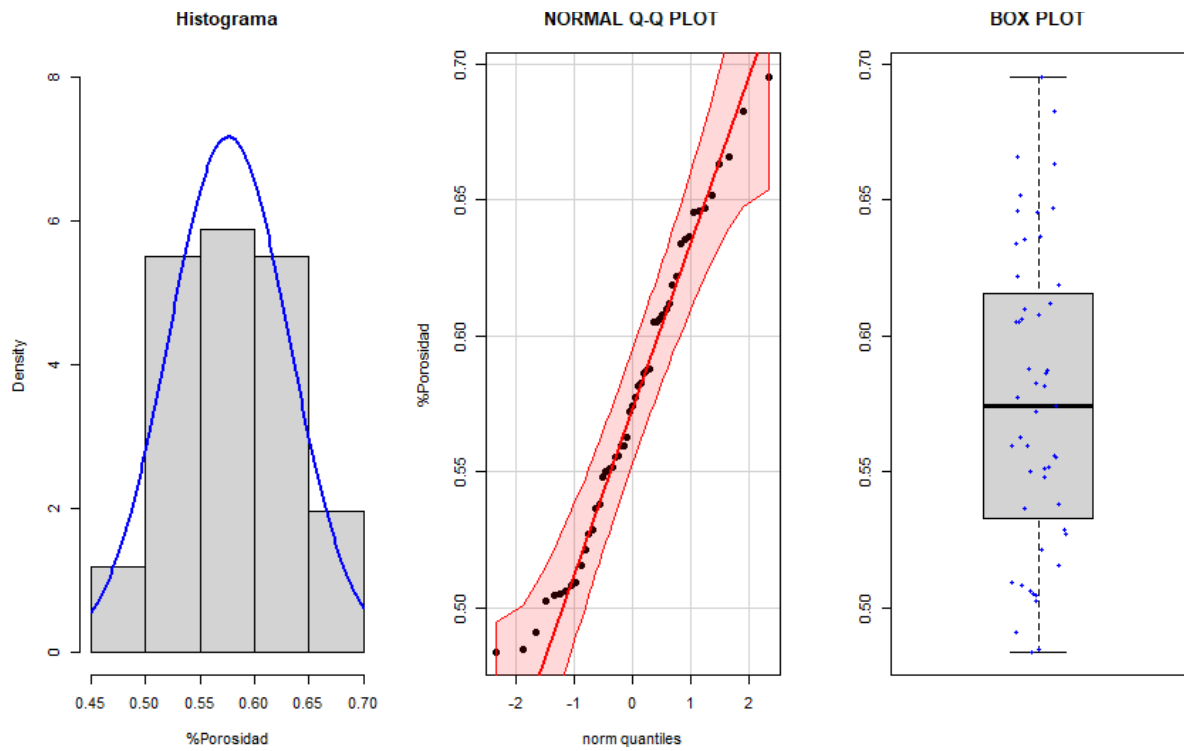


Figura 27. Gráficos descriptivos de la porosidad del suelo

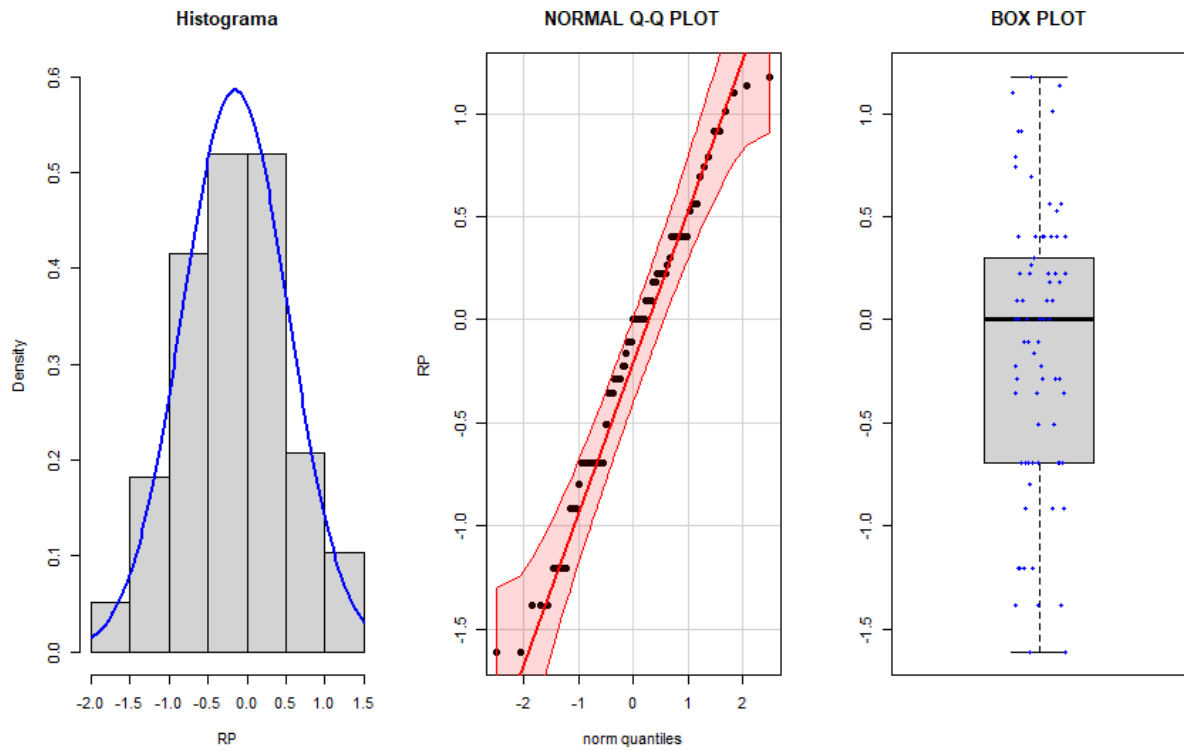


Figura 28. Gráficos descriptivos de la resistencia mecánica a la penetración del suelo

```
library("readxl")
install.packages("ggplot2")
library("ggplot2")
install.packages("ape")
library("ape")
install.packages("knitr")
library("knitr")

BD_MODELADO <- read_excel("C:/Users/HP/Desktop/DATA TESIS/ESTAD/TE.xls")
View(BD_MODELADO)

dists <- as.matrix(dist(cbind(BD_MODELADO$ESTE,BD_MODELADO$NORTE)))
dists.inv <- 1/dists
diag(dists.inv) <- 0
dists.inv[1:5, 1:5]

Moran.I(BD_MODELADO$ARENA,dists.inv)
knitr::include_graphics("C:/Users/HP/Desktop/DATA TESIS/BD_MODELADOCE75png.png")

moran.plot(BD_MODELADO$ARENA,dists.inv)
```

Figura 29. Código de compilación I de Morán