



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

MODELAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL ALTIPLANO PUNO - MICROCUCENCA PACRAMAYO

PRESENTADA POR:

DANIEL CANAZA MAMANI

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2023

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

MODELAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL ALTIPLANO PUNO -MICROCUEENCA PACRAMAYO

AUTOR

DANIEL CANAZA MAMANI

RECuento DE PALABRAS

24318 Words

RECuento DE CARACTERES

139069 Characters

RECuento DE PÁGINAS

123 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

15.2MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 25, 2024 3:37 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 25, 2024 3:39 PM GMT-5

● **17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 11% Base de datos de trabajos entregados
- 8% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)


Ph. D. Elmer Elio Calizaya Llatasi
CIP. 110027



Resumen



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE

TESIS

MODELAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE
CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL ALTIPLANO PUNO-
MICROCUCUENCA PACRAMAYO



PRESENTADA POR:

DANIEL CANAZA MAMANI

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE


.....
D.Sc. NAZARIO VILLAFUERTE PRUDENCIO

PRIMER MIEMBRO


.....
D.Sc. EVARISTO MAMANI MAMANI

SEGUNDO MIEMBRO


.....
D.Sc. JAVIER MAMANI PAREDES

ASESOR DE TESIS


.....
Ph.D. ELMER ELIO CALIZAYA LLATASI

Puno, 21 de diciembre de 2023.

ÁREA: Ciencia de la Ingeniería.

TEMA: Modelamiento espacial para la estimación de reservas de carbono orgánico del suelo en el altiplano Puno – Microcuenca Pacramayo.

LÍNEA: Recursos Naturales y del Medio Ambiente.



DEDICATORIA

A mis padres Simón y Biviana, con profundo cariño y gratitud, por ser los pilares más importantes en mi vida, y que desde el cielo iluminan mi camino. A mis hermanos Fernando Hernán e Hilda Cristina, que siempre fueron mi soporte familiar y emocional en mi vida.

A mi esposa Berna, mi sincero agradecimiento por su constante y decidido apoyo en el logro de mis objetivos e impulsar a tener más retos y objetivos en la vida, principalmente en la culminación de la presente tesis.

A mis hijos Vladimir Paúl y su esposa Reyna, David Daniel y su esposa Marisol, y Karina Pilar y su esposo Walter, mis agradecimientos por el apoyo incondicional en la finalización de la presente investigación.

Daniel Canaza Mamani



AGRADECIMIENTOS

Al Ph.D. Elmer Elio Calizaya Llatasi, mi sincero agradecimiento por la confianza depositada en mi persona y la acertada dirección en la culminación de la presente investigación.

Quiero expresar mi gratitud al Ingeniero Walter Chambi Turpo por su invaluable apoyo durante la finalización de este trabajo de tesis.

Daniel Canaza Mamani



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ACRÓNIMOS	x
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco teórico	6
1.1.1	El Suelo	6
1.1.2	Carbono Orgánico del Suelo (COS)	7
1.1.3	Contenido de COS según uso de la tierra en agroecosistemas	8
1.1.4	Efectos del clima en el Carbono Orgánico del Suelo	9
1.1.5	El mapeo de carbono orgánico del suelo	10
1.1.6	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	12
1.1.7	Teledetección	12
1.1.8	Covariables Topográficas	14
1.1.9	Geoestadística	15
1.2	Antecedentes	18
1.2.1	Internacionales	18
1.2.2	Nacionales	19
1.2.3	Locales	20

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	24
2.2	Enunciados del problema	25
2.2.1	Problema general	26



2.2.2	Problemas específicos	26
2.3	Justificación	26
2.4	Objetivos	27
2.4.1	Objetivo general	27
2.4.2	Objetivos específicos	27
2.5	Hipótesis	27
2.5.1	Hipótesis general	27
2.5.2	Hipótesis específicas	28

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	29
3.2	Población	30
3.3	Muestra	30
3.4	Método de investigación	30
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	31
3.5.1	Delimitación de la microcuenca	32
3.5.2	Método de muestreo para cuantificar carbono orgánico del suelo (COS)	32
3.5.3	Distribución espacial de COS por el método de Kriging Ordinario (KO)	34
3.5.4	Procesamiento de datos de precipitación y temperatura	36
3.5.5	Procesamiento de imagen Landsat 8 OLI y NDVI	37
3.5.6	Clasificación de cobertura y uso actual de la tierra	37
3.5.7	Correlación de Pearson de COS entre variables ambientales y climatológicas	38
3.5.8	Metodología Superposición pondera en ArcMap	38

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados	41
4.1.1	Variabes ambientales en la determinación de carbono orgánico del suelo (COS)	41
4.1.2	Variabilidad espacial de reservas de carbono orgánico del suelo (COS) por Kriging Ordinario (KO)	49



4.1.3	Modelamiento espacial por superposición ponderada entre el COS, uso actual de la tierra y variables ambientales	56
4.2	Discusión	74
	CONCLUSIONES	80
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	82
	ANEXOS	101



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Información climática y cartográfica	31
2. Contenido de COS y variables ambientales a diferentes profundidades del suelo	42
3. Correlación Pearson (r) entre el COS y variables ambientales a diferentes profundidades del suelo	43
4. Uso actual de la tierra	58
5. Variabilidad espacial de COS y uso actual de la tierra	61
6. Ponderación de variables ambientales en el modelamiento espacial de COS a diferentes profundidades del suelo	66
7. Ponderación de variables ambientales para el modelamiento de COS	67
8. Ponderación de variables ambientales en el modelamiento de COS en la capa superior del suelo	70

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Ubicación de la Microcuenca Pacramayo y puntos de muestreo del suelo	30
2. Modelo de delimitación de la microcuenca hidrográfica con la herramienta ArcToolbox – hydrology model builder – ArcMap	32
3. Lectura y muestreo de un perfil del suelo	34
4. Esquema de superposición ponderada para el modelo ráster	39
5. Flujograma de la metodología y procedimientos para determinar la variabilidad espacial del COS	40
6. Correlación de Pearson a 0-20 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MOS y d) COS y Elevación	44
7. Correlación de Pearson 20-45 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MO y d) COS y elevación	44
8. Correlación de Pearson 45-105 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MO y d) COS y elevación	45
9. Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de precipitación media anual	47
10. Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de temperatura media anual	48
11. Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de pendientes	49
12. Análisis de tendencia de COS de 0-20 cm de profundidad	51
13. Semivariograma de variabilidad de COS de 0-20 cm de profundidad	51
14. Semivariograma de variabilidad de COS de 20-45 cm de profundidad	51
15. Variabilidad espacial de COS de 0 – 20 cm de profundidad del suelo	54
16. Variabilidad espacial de COS de 20 - 45 cm de profundidad del suelo	55
17. Variabilidad espacial de COS de 45-105 cm de profundidad del suelo	56
18. Mapa de uso actual de la tierra	60
19. Variabilidad espacial de COS y uso actual de la tierra	65
20. Esquema de modelamiento por superposición ponderada del COS y variables ambientales	68
21. ArcMap y modelamiento espacial del COS, de 0 – 20 cm de profundidad	69
22. Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, de 0-20 cm de profundidad.	71
23. Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, 20-45 cm de profundidad	72
	vii



- 24.** Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, 45-105 cm de profundidad

73



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Matriz de consistencia	101
2. Determinación de reservas de carbono orgánico del suelo	102
3. Variabilidad espacial de carbono orgánico con profundidad del suelo	104
4. Panel fotográfico	105
5. Análisis de caracterización de suelos	108
6. Declaración jurada de autenticidad de tesis	112
7. Autorización para el depósito repositorio institucional	113



ACRÓNIMOS

COS	: Carbono orgánico del suelo
CGC	: Ciclo global de carbono
CGC	: Ciclo Global del Carbono
CLC	: Corine Land Cover
COS(r)	: Reserva de carbono orgánico del suelo
KO	: Kriging Ordinario
MDE	: Modelo digital de elevación
MDT	: Modelo Digital de Terreno
MO	: Materia orgánica
MOS	: Materia orgánica del suelo
NASA	: The National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Índice d vegetación de diferencia normalizada
PPN	: Producción primaria neta
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	: Sistemas de información geográfica
UAT	: Uso actual de la tierra
USGS	: United States Geological Survey

RESUMEN

El carbono orgánico del suelo (COS) juega un papel crucial en el equilibrio ambiental de los Andes peruanos, estando influenciado por la diversidad biológica, las características del suelo y las condiciones climáticas. La investigación se realizó en la Microcuenca Pacramayo, ubicada en la región andina del Perú. El objetivo fue estimar la variabilidad espacial de COS, modelamiento y mapeo digital del suelo. Se utilizó la correlación de Pearson para relacionar el COS con las variables ambientales. Para estimar la variabilidad espacial del COS, se aplicó el método geoestadístico de Kriging Ordinario y para el modelamiento y mapeo digital, se empleó el método de superposición ponderada entre variables ambientales y uso de la tierra. Los resultados mostraron correlaciones significativas en la capa superior del suelo, con índices de Pearson (r) de 0.402, 0.388, -0.318 y 0.592, para altitud, precipitación, temperatura y materia orgánica, respectivamente. El COS reveló notable variación, con rangos que oscilan desde 1.93 Kg/m² en zonas cultivadas a 6.81 Kg/m² en zonas de pastoreo natural. El modelamiento espacial por superposición ponderada identificó niveles variables de COS, así en áreas cultivadas se estimó en < 3 kg/m², en zonas intermedias fluctuó de 3 a 5 kg/m² y en zonas altas con pasturas naturales las reservas de COS aumentaron de 5 a 6.8 kg/m². En conclusión, en los ecosistemas andinos del Perú, las pasturas naturales ubicadas a mayor altitud tienen las mayores reservas de COS del suelo, mientras que las áreas cultivadas a menor altitud presentan menores reservas.

Palabras clave: Carbono orgánico, kriging ordinario, superposición ponderada; uso de la tierra, variabilidad espacial

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) plays a crucial role in the environmental balance, influenced by biological diversity, soil characteristics, and climatic conditions. This work aimed to estimate the spatial variability of SOC, modeling, and digital soil mapping at Pacramayo micro-watershed, located in the Southeast Andean region of Peru. The correlation of Pearson was used to relate COS to environmental variables. The spatial variability of COS was estimated through the ordinary Kriging geostatistical method. Modeling and digital mapping were done using the weighted overlap method between environmental variables and the soil. Results showed significant correlations in the topsoil layer, with Pearson indices (r) of 0.402, 0.388, -0.318, and 0.592 for altitude, precipitation, temperature, and organic matter, respectively. COS revealed remarkable variation, with ranges from 1.93 kg/m² in cultivated areas to 6.81 kg/m² in naturally grazed areas. Spatial modeling by weighted overlay estimated different COS values. In cultivated areas, it was < 3 kg/m²; in intermediate zones, it was from 3 to 5 kg/m²; and in high areas with natural pastures, it was from 5 to 6.8 kg/m². In conclusion, in Peru Andean ecosystems, natural pastures at higher altitudes have the highest COS reserves.

Keywords: Soil organic carbon, ordinary kriging, weighted overlay; soil use, spatial variability.



WENCESLAO T. MEDINA ESPINOZA
Ing. Industrias Alimentarias Reg. OIP 39643
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

INTRODUCCIÓN

Comprender la variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) es crucial para una gestión eficaz del suelo y para las estrategias de secuestro de carbono orgánico (FAO, 2017). El suelo es un importante depósito de carbono cuya capacidad de almacenamiento puede variar en función del tipo de vegetación y los factores de altitud (Ayala et al., 2017). En los ecosistemas de montaña suele haber una notable variación en las reservas de COS, debido a la diversidad de tipos de suelo, condiciones climáticas, patrones de vegetación y gradientes de altitud (Pandian y Ravichandran, 2020).

La mayor parte del almacenamiento de carbono terrestre se produce en los suelos, ya que el orgánico procede de organismos vivos (Soil Survey Staff, 1999). En consecuencia, el destino del COS se convierte en un asunto de gran preocupación cuando se consideran el cambio climático, el uso de la tierra y los cambios de gestión. Los cambios en el uso de la tierra, como la deforestación o la conversión a la agricultura, pueden conducir a la pérdida profunda de COS debido al aumento de la erosión, la reducción de los aportes de materia orgánica y la alteración de la estructura del suelo (Alegre Oré, 2021; Condor Meza, 2019).

Los modelados de COS son herramientas valiosas para proyectar el impacto de los cambios en la gestión del suelo sobre las reservas de COS a lo largo del tiempo. Estos modelados simulan los procesos implicados en la dinámica del COS, como las entradas de carbono procedentes de residuos vegetales, biomasa radicular y enmiendas orgánicas, así como las pérdidas de carbono por descomposición y erosión. Considerando una variedad de factores como el clima, las características del suelo, el tipo de vegetación y las estrategias de manejo, estos modelos tienen la capacidad de prever posibles variaciones en las reservas de COS en diferentes situaciones (Herold y Johns, 2007).

La topografía del paisaje influye en las propiedades y procesos del suelo al afectar al movimiento del agua, los nutrientes y otras sustancias tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo. Comprender los controles topográficos sobre la dinámica del suelo es decisiva para gestionar los recursos edáficos, optimizar la eficiencia en el uso del agua y mitigar la erosión y la pérdida de nutrientes en un paisaje (Llambí et al., 2012).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección, combinados con la disponibilidad de información sobre las características del suelo, permiten enfoques más cuantitativos para predecir la distribución espacial del carbono orgánico del suelo en función de los factores de formación del suelo. La combinación de teledetección y SIG proporciona herramientas valiosas para comprender la dinámica espaciotemporal de las tierras de cultivo y estudiar la densidad del carbono orgánico del suelo. Estos enfoques ayudan a evaluar el impacto de los cambios en la cubierta terrestre, la dinámica de la vegetación y los factores medioambientales en la dinámica del carbono del suelo (Suárez, 2014).

Algunos estudios sobre la distribución del COS emplean diversos métodos y técnicas para evaluar y cartografiar el contenido de COS en los paisajes. Estos estudios suelen tener en cuenta factores como la metodología de muestreo, la precisión de los resultados y las técnicas de interpolación de datos para comprender de forma exhaustiva los patrones de distribución del COS. El método geoestadístico es un potente enfoque para estimar las reservas de carbono del suelo aprovechando las relaciones espaciales y las técnicas de interpolación (Chilès y Delfiner, 1999), permite realizar estimaciones más precisas a escalas medias y menores, principalmente cuando los datos de muestreo son limitados.

La distribución espacial del COS a partir de datos de sondeos puntuales puede estimarse utilizando diversos métodos de interpolación e incorporando variables espaciales adicionales. Uno de estos métodos es el Kriging Ordinario (KO), que combina los principios del análisis de regresión y la geoestadística (Ghiasi y Nafisi, 2016), además, utiliza el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para obtener el mapa de uso actual de tierras, datos climatológicos y el modelo de elevación digital (DEM) para mejorar el modelamiento de la variabilidad espacial de reservas del COS (Richards, 2003).

Las implicaciones y la relevancia de esta investigación ayudan a entender cómo varía el carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas de alta montaña en Puno, Perú. El objetivo general es determinar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo mediante el modelamiento espacial y mapeo digital del suelo por superposición ponderada de uso de la tierra y variables ambientales y los objetivos específicos: 1. Identificar variables ambientales representativas en la determinación de COS, 2. Estimar



la variabilidad espacial de COS mediante el método geoestadístico de Kriging Ordinario y 3. Modelamiento de carbono orgánico del suelo por superposición ponderada entre el uso de la tierra y variables ambientales.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 El Suelo

El suelo constituye un elemento natural presente en la superficie terrestre, compuesto por componentes sólidos (minerales y materia orgánica), así como por líquidos y gases, ocupa un espacio y se distingue por su estructura en capas u horizontes sobre el material inicial que se forman a consecuencia de cambios como adiciones, pérdidas, translocaciones y transformaciones de energía y materia, o bien por su capacidad para mantener el crecimiento de plantas en su estado natural (Soil Survey Staff, 1999).

El suelo representa un elemento esencial dentro del entorno natural, y su existencia es finita. Consiste en una combinación de minerales, aire, agua, materia orgánica y diversos organismos que abarcan desde niveles macroscópicos hasta microscópicos. Estos elementos realizan funciones esenciales tanto de naturaleza biológica como no biológica, desempeñando un papel crucial en beneficio de la sociedad y el medio ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016). El suelo sirve como un medio para el transporte y el almacenamiento de agua y gases, como el dióxido de carbono, que tienen un impacto en el clima global.

Si bien el mapeo espacial de las propiedades del suelo es importante, también es importante comprender la evolución de estas propiedades del suelo y los procesos responsables de la variabilidad espacial observada de las propiedades del suelo. Para cuantificar estos procesos y predecir la evolución de las características del suelo a lo largo del tiempo, se requieren modelos dinámicos basados en procesos (Hoosbeek y Bryant, 1992). Estos modelos de procesos mecanicistas predicen las propiedades del suelo utilizando atributos geomorfológicos y varios procesos físicos como meteorización, erosión y bioturbación (Minasny y McBratney, 1999).

Es fundamental vincular la transformación del perfil del suelo con la evolución del relieve para lograr una precisa predicción de los atributos del suelo que se distribuyen en el espacio y para identificar cómo cambian estos atributos con el paso del tiempo.

En el Perú, los mapas de suelos se producen por métodos convencionales y establecidos por un ente rector que luego son digitalizados para ser utilizados en diferentes proyectos agrícolas y ambientales a través de sistemas de información geográfica asumiendo que las propiedades del suelo están en equilibrio con el paisaje donde se desarrollaron. Una propuesta que ayuda a mejorar estas limitaciones es el mapeo digital de suelos con enfoque de la influencia del paisaje en el porcentaje de materia orgánica del suelo.

1.1.2 Carbono Orgánico del Suelo (COS)

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Rosell, 1999). Además, incluye una fracción viva o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Aguilera, 2000). El componente más significativo de la MOS es el COS, lo que a menudo da lugar a la confusión o al uso intercambiable de ambos términos.

En los entornos forestales, el COS se origina principalmente a partir de la descomposición de hojas caídas, troncos de árboles muertos y raíces de árboles. Mientras que, en las praderas, una gran proporción de la materia orgánica proviene de las raíces de las plantas y de las hierbas. En las tierras de cultivo, los residuos de las cosechas se añaden a la materia orgánica (Porta y Roquero de Laburo, 2003).

El Carbono Orgánico del Suelo (COS) hace referencia al carbono que persiste en el suelo después de que los materiales originados por organismos vivos se descomponen de manera parcial. Cumple un papel crucial en el ciclo global del carbono a medida que se desplaza a través de la atmósfera, la vegetación, el suelo, los cuerpos de agua y los océanos. El COS representa el componente central de la MOS y, en resumen, sirve como el "combustible" esencial para el suelo. La MOS

desempeña una función primordial en diversas actividades del suelo al mejorar la estabilidad de su estructura, al retener y liberar nutrientes vitales para las plantas, y al facilitar la capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo. La pérdida de COS señala un grado de degradación del suelo. (FAO, 2017).

1.1.3 Contenido de COS según uso de la tierra en agroecosistemas

Frecuentemente, las alteraciones en el uso y gestión de la tierra, como la transformación de áreas boscosas o pastizales en terrenos destinados a la agricultura, conllevan a la pérdida de MO (Davidson y Ackerman, 1993; Hevia et al., 2003). La actividad antrópica ha alterado la dinámica de la MO, produciendo en general una disminución del contenido que existía bajo la vegetación natural (Andriulo y Rivero, 2001). No obstante, la actividad humana en el entorno ha manifestado diversas peculiaridades.

El cambio de sistemas de labranzas del arado de reja y vertedera a los sistemas de labranza mínima (Stockfisch et al., 1999), particularmente la implementación de la siembra directa ha posibilitado un aumento en los niveles de MO en el suelo. La materia orgánica del suelo (MOS), y en particular, el COS, desempeñan un papel importante en la conservación y el fortalecimiento de las características físicas, químicas y biológicas.

Es fundamental resaltar la naturaleza dinámica e interconectada del sistema de suelo, ya que las modificaciones en una propiedad probablemente influirán en otras propiedades del suelo. La utilización de la tierra tiene una función crucial en la mitigación del cambio climático, dado que constituye el principal sumidero de carbono (FAO, 2002) Los cambios en utilización de la tierra provocan emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2000). Por ejemplo, en suelos de páramo en Colombia, (Andrade et al., 2014) evidenciaron que el pastoreo extensivo promueve la acumulación de carbono orgánico del suelo (COS) en las capas superficiales del suelo, específicamente en los primeros 30 centímetros de profundidad.

En la región de los Andes peruanos, los páramos y los bosques naturales, ya sea en forma continua o en forma de fragmentos, son los ecosistemas de vegetación natural de mayor relevancia, considerando su impacto en los aspectos

económicos, sociales y ecológicos (Mena et al., 2011). Desde una perspectiva ecológica, los páramos desempeñan un papel fundamental en cuanto a funciones ambientales, como el almacenamiento y fijación de carbono (Ordóñez y Masera, 2001). Este servicio ecológico desempeña un papel crucial en el ciclo de nutrientes específicos y contribuye significativamente a la reducción de efectos perjudiciales derivados del Cambio Climático.

La retención de carbono implica la extracción del dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera para su conservación en varios elementos del ecosistema, destacándose el suelo debido a su considerable capacidad de almacenamiento y retención (Ayala et al., 2017). Mediante la adecuada gestión y preservación de los páramos, garantizamos la protección del suelo y la preservación de su contenido de carbono orgánico. Contradictoriamente si se produce alguna alteración, entre ellas las labranzas como actividad de la agricultura, el Carbono se volatiliza (Martínez y Fuentes; Acevedo, 2008).

1.1.4 Efectos del clima en el Carbono Orgánico del Suelo

El clima que prevalece en las diversas altitudes de la cordillera de los Andes tiene una influencia significativa en la configuración de las características de los suelos. Asimismo, el propio relieve, influye en los patrones de lluvia y temperatura. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2000), indican que, en el caso de suelos minerales, las variaciones en la retención de carbono se fundamentan en la premisa de que, en una zona climática y tipo de suelo determinados, el COS se mantiene en equilibrio bajo una determinada utilización del suelo, un conjunto de prácticas de manejo y un régimen de perturbaciones constantes.

Por lo tanto, cualquier modificación en la utilización del suelo, en los métodos de manejo, o en el nivel de disturbios, ocasiona una alteración en el COS, que se presume se desarrolla de manera gradual durante un período predeterminado de 20 años. El clima ha sido identificado como el factor de mayor efecto sobre los contenidos de carbono (Yang y Fang, 2007), porque influye en las entradas y salidas de carbono en los ecosistemas al afectar la producción primaria neta y la mineralización de la materia orgánica.

Las temperaturas más cálidas pueden aumentar la producción primaria pero también acelerar la mineralización, lo que puede tener efectos complejos en el equilibrio del carbono en un ecosistema. La precipitación y la humedad también desempeñan un papel importante en estos procesos. Por lo tanto, el clima desempeña un papel fundamental en la dinámica del carbono en la Tierra (Post y Stangenberger, 1982). La precipitación es un factor crítico que influye en la PPN en la mayoría de los ecosistemas terrestres, debido a su papel en la disponibilidad de agua para las plantas; en tanto la temperatura controla la duración de la estación de crecimiento y la disponibilidad de agua para las plantas, ambos con efectos muy importantes sobre la productividad primaria (Jobbágy y Paruelo, 2002).

Tanto la temperatura como la humedad pueden variar según la ubicación geográfica y las estaciones del año, lo que a su vez afecta la actividad microbiana en diferentes momentos y lugares. Estos factores son fundamentales para comprender cómo se descomponen los materiales orgánicos, se libera carbono y se reciclan nutrientes en los ecosistemas. Se ha notado que la emisión de dióxido de carbono (CO₂) desde el suelo se incrementa con el aumento de la temperatura y la humedad. Sin embargo, en ciertos lugares, la humedad del suelo apenas influye en el proceso de descomposición de la materia orgánica (Alvarez y Alvarez, 2001).

En líneas generales, se ha notado que las concentraciones de carbono en el suelo son más elevadas en áreas con un clima húmedo en comparación con aquellas que son áridas o semiáridas, y también son mayores en climas fríos en contraposición a climas cálidos (Yang y Fang, 2007). La distribución de la vegetación está en gran medida influenciada por la temperatura y la cantidad de precipitación. En condiciones de temperaturas bajas, la actividad biológica se reduce, lo que a su vez reduce la descomposición de la materia orgánica, lo que facilita la acumulación significativa de COS.

1.1.5 El mapeo de carbono orgánico del suelo

Hoy en día, las tecnologías de observación remota están experimentando un constante avance y se están lanzando al mercado nuevos satélites con sensores de forma regular (De Sy et al., 2012). Se plantea que numerosos investigadores están debatiendo sobre las especificaciones técnicas requeridas para establecer

sistemas nacionales de monitoreo de suelos y bosques. Estos debates han llevado a la conclusión de que es esencial incorporar datos satelitales en la observación de la Tierra, en combinación con datos obtenidos mediante mediciones en el terreno. Esto permite desarrollar modelos que representen de manera explícita la distribución espacial de manera altamente precisa (Herold y Johns, 2007).

En resumen, se pueden crear mapas temáticos, como el de COS, empleando diversos métodos de interpolación espacial que se basan en datos puntuales. En este contexto, los métodos de interpolación espacial representan una herramienta fundamental para la generación de mapas detallados y específicos en términos de su ubicación geográfica (Lin y Chen, 2004). Los procedimientos utilizados para predecir mapas mediante el empleo de covariables, tales como el modelo de regresión múltiple, establecen conexiones entre el elemento geográfico que se pretende analizar en COS y los factores ambientales, como la topografía, la vegetación y otros (Ersahin, 2003).

Los métodos híbridos, como la regresión kriging y la co-kriging, hacen uso de las autocorrelaciones espaciales y las vinculan entre el elemento geográfico en cuestión y sus covariables para llevar a cabo la predicción de mapas mapas (Robinson y Metternicht, 2006). De manera general, se encuentra consenso en que la precisión de los mapas puede incrementarse al emplear enfoques híbridos que integren información adicional, como la litología, topografía, exposición solar, pendiente, entre otros (Lin y Chen, 2004; Minasny y McBratney, 2007).

Dado el valor crítico del suelo como un reservorio de carbono y considerando el aumento en la aceptación de los SIG, además de la mayor accesibilidad a datos de sensores remotos sin costo en los últimos años, se ha extendido el empleo de métodos geoespaciales para la elaboración de mapas temáticos que representan el COS. Entre estos métodos, la Regresión Kriging se destaca como uno de los más ampliamente empleados. La Regresión Kriging es una técnica de interpolación espacial que combina la regresión de la variable de interés con variables auxiliares, como datos topográficos, imágenes de sensores remotos y mapas temáticos (Hengl et al., 2007).

1.1.6 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se utilizan comúnmente como bases de datos geoespaciales. Estos sistemas son herramientas informáticas diseñadas para capturar, almacenar, gestionar, analizar y visualizar datos que tienen una referencia espacial, es decir, datos relacionados con ubicaciones geográficas específicas en la Tierra. En este contexto, los SIG funcionan como bases de datos especializadas que almacenan información geográfica, como mapas, capas de información geoespacial y atributos asociados a lugares específicos (Cowen, 1988).

La definición proporcionada por National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA, 1990), ofrece una descripción más completa de los SIG: "Un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la solución de problemas complejos de planificación y gestión. Los SIG brindan la capacidad de integrar de manera ágil y efectiva diversas variables relacionadas con la densidad de la vegetación (datos dasométricos) y las condiciones del suelo y el clima (datos edafoclimáticos) en una ubicación específica. Esto se logra al incorporar información espacial del entorno a través de mapas temáticos.

Posteriormente, los SIG permiten la generación de mapas resultantes de los análisis realizados en plantaciones comerciales, como la cartografía de la distribución del carbono en una zona geográfica determinada. Este análisis, a partir de una mezcla lineal de probabilidades ponderadas, permite identificar, según la aptitud de cada cobertura temática, la interdependencia entre estas covariables (Bagyaraj et al., 2013). En el mapeo de la variabilidad del COS se emplean covariables ambientales como, topográficas, climáticas y cobertura del suelo.

1.1.7 Teledetección

La teledetección es una técnica que permite adquirir información sobre un objeto o área sin necesidad de estar en contacto directo con él. Esto se logra gracias a la relación entre sensores y la superficie en estudio, basada en las

características de la radiación electromagnética y su interacción con la superficie terrestre (Suárez, 2014).

De acuerdo con el Protocolo de Kyoto establecido en 1997, la teledetección se considera una herramienta esencial para abordar las demandas de información geoespacial, ya que facilita la monitorización y medición de la biomasa vegetal, los patrones de uso del suelo y sus cambios. Esta información resulta fundamental para la evaluación de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, que están estrechamente vinculadas con la vegetación y los usos de la tierra. El reto es conseguir tecnologías robustas y operativas que aporten transparencia, eficiencia en los costes y precisión, y que permitan una actualización y desarrollo continuos (Richards, 2003).

En términos generales, la obtención de información a partir de imágenes de teledetección se puede dividir en dos categorías principales: la extracción de información basada en la interpretación visual de las imágenes (utilizando métodos de análisis visual para identificar características como el uso del suelo y la vegetación), y la extracción de información a través del procesamiento semiautomatizado realizado por programas informáticos en una computadora (esto incluye técnicas como la clasificación de imágenes digitales, la creación de Modelos Digitales de Elevación - DEM, el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

La combinación de ambos métodos es comúnmente utilizada para aprovechar al máximo la información que ofrecen las imágenes de teledetección (Chuvienco, 2002). Los SIG son una herramienta que facilita el análisis multicriterio (Basildo y López, 1998) de diversas capas de información ambiental (covariables) para un tema geográfico de interés. Este análisis, a partir de una mezcla lineal de probabilidades ponderadas, permite identificar, según la aptitud de cada cobertura temática, la interdependencia entre estas covariables (Bagyaraj et al., 2013). En el mapeo de la variabilidad del COS se emplean covariables ambientales como, topográficas, climáticas y cobertura del suelo.

1.1.8 Covariables Topográficas

El uso de covariables topográficas es fundamental para comprender diversas características del suelo en regiones de alta montaña, como el ecosistema alto andino. Tanto la elevación como la pendiente son dos de las variables topográficas clave que, cuando se emplean de manera individual o en conjunto, permiten caracterizar el suelo desde una perspectiva topográfica. Esto resulta especialmente importante cuando se busca establecer posibles relaciones entre estas variables topográficas y la cantidad de COS.

La elevación proporciona información sobre la altitud de un área en particular, lo que puede estar relacionado con las condiciones climáticas y la vegetación presente. A medida que aumenta la altitud, las precipitaciones también tienden a incrementarse, lo que contribuye a regular el sistema hídrico y es esencial para el funcionamiento adecuado de las actividades humanas y la sostenibilidad del ecosistema. En las áreas planas, los suelos tienden a retener y acumular agua en lo que se conoce como "almohadillas," que son zonas herbáceas naturales que desempeñan un papel crucial en el aumento de la materia orgánica en el suelo. Estas variaciones en las propiedades del suelo en función de la topografía tienen un impacto importante en la biodiversidad y el funcionamiento ecológico de los ecosistemas altoandinos (Llambí et al., 2012).

Las variaciones en la altitud están relacionadas con cambios en la temperatura, la precipitación y otros factores ambientales que afectan la formación, la descomposición y la acumulación de la materia orgánica en el suelo. A medida que la altitud aumenta, generalmente las temperaturas y el pH del suelo disminuyen significativamente (Griffiths et al., 2009), la acumulación de materia orgánica en el suelo (MOS) parece deberse más a una reducción en las tasas de descomposición que a un aumento en la productividad primaria; sin embargo, la acumulación de MOS en las laderas orientadas al norte probablemente se deba tanto a una disminución en la descomposición como a un aumento en la producción primaria.

La pendiente, es una medida importante para comprender la topografía de un área, ya que influye en la forma en que el agua fluye a través del terreno, la erosión, la distribución de la vegetación y muchas otras características

geomorfológicas y ecológicas. Además, la pendiente es una variable clave en análisis topográfico y estudios relacionados con la geografía y la geología (Olaya, 2009). Por otro lado, Garnica y Saldarriaga (2015) explican que una pendiente mayor influye en la formación del suelo y el espesor disminuye en zonas altas del páramo mientras en las zonas bajas y medias aumenta.

La gestión adecuada de suelos en áreas con pendientes pronunciadas es fundamental para prevenir la erosión y mantener la salud del suelo. Esto puede incluir prácticas de conservación del suelo, como la terraza, la reforestación, la siembra de cultivos de cobertura y otras estrategias diseñadas para reducir la erosión y promover la sostenibilidad del suelo en estas áreas (Elizalde et al., 2000). Los suelos que se encuentran en los ecosistemas altoandinos tienen características distintivas, debido a su ubicación en elevaciones donde las temperaturas son más frías. Estos suelos presentan el potencial de albergar una amplia variedad de especies endémicas tanto en flora como en fauna.

1.1.9 Geoestadística

Chilès y Delfiner (1999) señalan que la Geoestadística es una disciplina que se define comúnmente como "la aplicación de métodos estadísticos y probabilísticos a las variables regionalizadas", esta definición resalta la idea fundamental de que la geoestadística se utiliza para analizar y modelar datos espaciales o georreferenciados, donde la ubicación geográfica es una característica importante de las observaciones. Los métodos geoestadísticos permiten modelar la variabilidad espacial de estas variables y proporcionar estimaciones más precisas en ubicaciones no muestreadas a través de técnicas de interpolación espacial, como la kriging (Le Loc'H, 2005).

La Geoestadística se emplea para anticipar valores de una variable en función del espacio y el tiempo, formando parte de una correlación entre estos datos, lo que se conoce como análisis estructural o variograma. El Variograma se emplea para cuantificar la correlación entre observaciones espacialmente distribuidas y para deducir las estimaciones de las variables aleatorias en puntos no muestreados (Martínez-Vargas y Ramírez-García, 2005), según esto podemos observar que tan parecidos pueden ser los puntos en el espacio a medida que se encuentran más alejados.

El análisis estructural o estudio variográfico según Armstrong y Carignan (1997) está compuesto por el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste a este de un modelo teórico conocido. El cálculo del semivariograma experimental es “la herramienta Geoestadística más importante en la determinación de las características de viabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado” (Chica, 1987), es decir tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra.

A. Kriging Ordinario

El kriging es una herramienta esencial en el análisis espacial y la geoestadística, y se basa en la modelización de la estructura de correlación espacial de los datos mediante el variograma, que luego se utiliza para generar estimaciones precisas en ubicaciones no muestreadas. Como lo determina (Gamble et al., 2017), afirmando que este tipo de modelos permite realizar interpolaciones de datos en diferentes periodos de tiempo, con el ánimo de establecer en una forma muy precisa las variaciones o cambios de la calidad y disponibilidad del terreno en producción. Según (Córdoba et al., 2014). la técnica utilizada en geoestadística para realizar interpolaciones espaciales y predecir los valores de una variable en ubicaciones no muestreadas se llama "kriging" o "cúriga" en español.

Existen dos propiedades fundamentales de los métodos de kriging en geoestadística: predicción insesgada y varianza mínima. Un objetivo clave de los métodos de kriging es generar estimaciones que sean imparciales, lo que implica que, en promedio, no debe haber una diferencia entre los valores estimados y los valores observados para el mismo punto. En otras palabras, el estimador no debe sobreestimar ni subestimar sistemáticamente los valores reales, sino que debe tener un sesgo cercano a cero.

Además de ser insesgadas, las estimaciones de kriging también se esfuerzan por tener una varianza mínima entre todos los estimadores insesgados posibles. Esto significa que, de entre todos los posibles estimadores insesgados, el kriging selecciona aquellos que tienen la menor variabilidad. Esto es importante porque indica que las estimaciones de

kriging son precisas y confiables (Samper y Carrera, 1990). Del mismo modo, es posible categorizar los métodos de kriging en dos grupos: lineales y no lineales. Los métodos lineales, tales como el kriging simple, el ordinario y el universal, son considerados óptimos cuando se cumple con la normalidad multivariada y la independencia en la distribución de datos, representando así los mejores predictores lineales sin sesgo.

Los métodos no lineales no cumplen con estas condiciones (Giraldo, 2003). Kriging ordinario es el método más robusto y uno de los más empleados, ya que asume que no se conoce el valor promedio de la variable regionalizada, lo cual permite generalizar el kriging a situaciones donde esta media no es constante (Webster y Oliver, 2007). Este método, así como lo menciona (Córdoba et al., 2014) indican que en el Kriging Ordinario la media de la variable es estimada localmente. Por lo tanto, se desconoce la media de esta variable. El Kriging ordinario es la interpolación recomendada para patrones de puntos de una región, con el fin de obtener resultados más razonables (Ghiasi y Nafisi, 2016).

B. Superposición ponderada “Weighted overlay”

La superposición booleana de capas temáticas binarias ofrece un enfoque simple y rápido para un análisis de idoneidad con SIG. Sin embargo, para muchas aplicaciones la división de la realidad en dos categorías ("verdadero" y "falso") es una representación inadecuada de la realidad. En primer lugar, en el análisis booleano todos los factores que influyen tienen la misma importancia, por definición. Sin embargo, la mayoría de las veces los criterios no influyen por igual en la decisión. Cuando alguien compra un coche nuevo, su color y marca pueden tener más peso que su consumo de combustible o su susceptibilidad a sufrir averías. Este principio de asignar ponderaciones a los factores que influyen también se utiliza para el análisis de idoneidad en SIG, este enfoque se llama término superposición ponderada.

Los fenómenos naturales no están definidos por fronteras definidas y rara vez pueden agruparse en categorías binarias. Para poder crear un modelo realista de los posibles hábitats de los lobos, la clasificación binaria

en "bosque" y "no bosque" no es suficiente. Es necesario considerar un desglose más preciso de la cubierta vegetal. Las categorías binarias no son aptas para medir la influencia de variables espaciales como la precipitación anual o valores decrecientes con respecto a la distancia a la carretera. Se deben utilizar datos de intervalo o proporción (porcentaje de cubierta forestal) en lugar de datos categóricos (bosque/no bosque) (Leonowicz et al., 2015).

Mediante la aplicación del concepto de estratificación, es posible ampliar de manera sencilla la superposición al asignar niveles de relevancia a cada criterio. Se otorga un valor numérico de ponderación a cada estrato temático en función de su importancia relativa en relación con todos los demás estratos. Luego de esta etapa, las capas con ponderación se combinan de manera similar a como se hacía previamente. Este procedimiento recibe el nombre de superposición ponderada de términos (Weighted Overlay). En teoría, la superposición ponderada puede aplicarse tanto a datos ráster como vectoriales, de manera similar a la superposición booleana.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Internacionales

A nivel mundial, los suelos almacenan la mayor reserva de carbono orgánico terrestre en comparación con las reservas de carbono combinadas en la atmósfera y la biosfera (Le Quéré et al., 2016). El metro superior de suelo almacena aproximadamente 1408 Gt de Carbono orgánico (Batjes, 2016) e intercambia 60 Gt carbono/año con la atmósfera a nivel mundial. Dado el considerable almacenamiento de carbono en los suelos, incluso un ligero cambio en las reservas de carbono del suelo puede tener un impacto significativo en el ciclo global del carbono (GCC) (Olson et al., 2024). El suelo es un importante compartimiento dentro del ciclo global del Carbono, además de actuar como fuente o reservorio de Carbono hacia la atmósfera, dependiendo del uso que se le asigne (Martínez; Fuentes y Acevedo, 2008).

Cuando la vegetación natural ha sido sustituida por pastizales, los impactos no han sido tan evidentes (Galantini y Rosell , 1997) y en suelos degradados las pasturas han tenido la capacidad de incrementar los contenidos de MO. La transición de la ganadería a la agricultura ha resultado en una disminución en el contenido de materia orgánica en el suelo (Casanovas et al, 1995).

El manejo agrícola convencional de suelos, con uso intensivo del arado, promueve la liberación de Carbono hacia la atmósfera, mientras que el uso conservacionista favorece su acumulación en formas orgánicas dentro del suelo (Schulp et al., 2009). En la región interior de Mongolia, al norte de China se estudió y analizó cómo diversas comunidades de plantas y la profundidad del suelo, ejercen una influencia significativa en la biomasa de las raíces, el contenido de COS y su capacidad de retención aumentaron. Así *Koeleria cristata* presentó la mayor biomasa de raíces, seguida de *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii*, *Allium mongolicum*, *Stipa breviflora* y *Convolvulus ammannii*; en suelos asociado con *Koeleria cristata* mostró valores significativamente más altos de COS y una mayor capacidad de retención en comparación con el suelo relacionado con *Convolvulus ammannii* (Yajuan et al., 2022).

1.2.2 Nacionales

Los ecosistemas de montaña exhiben diferencias en las reservas de carbono orgánico del suelo (COS), debido a las variaciones en los tipos de suelo, las condiciones climáticas, los patrones de vegetación y los cambios en la elevación. (Pandian y Ravichandran, 2020), en las colinas de Courtallam, en la India, realizaron mediciones de las reservas de COS a tres profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), en cinco niveles de elevación forestal (200, 400, 600, 800 y 1000 msnm). Las reservas de COS aumentaron significativamente a medida que la altitud aumentaba en las tres profundidades. Las reservas totales de COS variaron desde 42,79 Mg/ha a una profundidad de 0-30 cm en las elevaciones más bajas (200 metros), hasta el valor más alto de 50,25 Mg/ha a la misma profundidad en las elevaciones intermedias de 600 metros.

Con respecto a la profundidad del suelo, los niveles de COS también variaron con el aumento de la altitud. (Dad, 2019), llevó a cabo un estudio en el ecosistema del Himalaya en 20 tipos de áreas, incluyendo pastos y no pastos, el

objetivo fue registrar las reservas COS en cinco profundidades (0-10; 10-20; 20-30; 30-40 y 40-50 cm) y analizar su variación en relación con la altitud y factores ambientales. Las reservas de COS mostraron una alta variabilidad, con valores que fluctuaron entre 28,85 y 94,76 Mg C/ha. Las reservas disminuyeron en: 30,63%, 22,98%, 21,06%, 14,89% y 10,41%, respectivamente. Hubo diferencias de COS entre los tipos de áreas, siendo ligeramente más altas en los pastos (59,69 Mg C/ha) comparadas con las áreas no pastosas (56,32 Mg C/ha).

1.2.3 Locales

El COS presenta una relación negativa con la profundidad del suelo y la densidad aparente, y una relación positiva con altitud (Balima et al., 2021) llevaron a cabo un estudio que relacionó la densidad de carbono en el suelo con cinco atributos estructurales (tres de diversidad y dos variables climáticas), utilizando mediciones de campo de 4575 arbustos y árboles en cuatro áreas protegidas y dos zonas climáticas. La densidad de carbono no mostró una variación significativa entre los cuatro bosques, pero aumentaron con la gradiente climática. En los sitios forestales, la densidad promedio de carbono osciló entre 47,82 y 67,95 Mg C/ha, mientras en zonas climáticas varió entre 48,48 y 64,02 Mg C/ha.

En otro estudio se encontró una correlación positiva entre la densidad de carbono y la precipitación, el área basal del rodal, el diámetro de los árboles a la altura del pecho (DAP), la altura de los árboles y la cobertura arbórea, se observó una correlación negativa con la temperatura. Munesh y Bussmann (2009), realizaron mediciones de reservas de COS en las gradientes altitudinales en los bosques subtropicales de coníferas y bosques templados del Garhwal Himalaya, se observó que las existencias de SOC disminuían con la altitud: de 185,6 a 160,8 t C/ha en los bosques templados de *Quercus leucotrichophora* y de 141,6 a 124,8 t C/ha, en los bosques subtropicales de *Pinus roxburghii*, respectivamente. En tales circunstancias, la gestión de vastas áreas de bosques del Himalaya en elevaciones más bajas puede considerarse como un importante sumidero para mitigar el dióxido de carbono atmosférico.

La variación de almacenamiento de carbono orgánico con la temperatura podría estar relacionado con la interferencia del efecto de precipitación. (Tan et

al., 2020), para minimizar la interferencia recopilamos muestras de suelo en una amplia escala geográfica a lo largo de la isohieta de 400 mm en China. Los resultados mostraron que el almacenamiento de COS respondió negativamente al aumento de temperatura con un coeficiente de respuesta de 0,24. La temperatura explicó más de la mitad de la variabilidad en las reservas de COS, que fue mucho mayor que los efectos combinados de la disponibilidad de agua, las propiedades del suelo, el tipo de vegetación y el tipo de suelo.

La relación negativa entre el stock de COS y la temperatura no se vio afectada por el tipo de vegetación y el tipo de suelo, lo que sugiere que esta relación puede ser un patrón general. (Guallpa-Calva et al., 2019), estimaron el carbono natural del suelo utilizando la estrategia de pérdida por ignición en pastizal y bosque nativo de la Reserva Huayrapalte en Ecuador, considerando tres niveles de altitudes: 3100, 3200 y 3300 msnm. y tres rangos de profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm), dispuestas en cuatro parcelas de 20 x 20 m en cada cota. El resultado fue que el contenido de carbono es más notable en profundidades de 20-30 cm en pastizal, con un 21,64% más que el estimado de 126,42 t/ha del bosque a la misma profundidad. La cantidad de carbono en su mayor parte dentro del suelo depende de su utilización, es menester considerar el impacto de temperatura, la elevación y la densidad de las vegetaciones como parámetros que intervienen en la acumulación de carbono.

A nivel nacional, también se realizaron muchos trabajos de investigación en la densidad de carbono orgánico del suelo con las variables medioambientales. El ecosistema de Bosques Montano de los Andes peruanos, son importantes sumideros de carbono orgánico del suelo (COS), que es afectado negativamente por la expansión de la frontera agrícola.

En la investigación Alegre Oré (2021) comparó el carbono orgánico en suelo y raíces, y evaluó las diferencias significativas entre las variables fisicoquímicas y cuatro sistemas de uso de suelo. Se evidenciaron diferencias significativas del COS entre los sistemas de uso de suelo en Bosque Montano Conservado y Cultivo, que registraron 231.17 y 299.28 t/ha respectivamente. La biomasa contenida en raíces finas presenta una media de 18.6 t/ha de Carbono.

Se evidenció que el almacenamiento de COS es influenciado por la capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y densidad aparente del suelo. (Condor, 2019) estimó el carbono natural del suelo en diferentes unidades fisiográficas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la selva, con muestreos en estratos de diferentes profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) en parcelas y subparcelas diferenciadas, extrayéndose en total 45 submuestras. La unidad fisiográfica montaña almacenó 101.26 t/ha de carbono orgánico, la colina de clase 2 almacenó máximo 95.64 t/ha, indicando que las montañas almacenaron mayor cantidad de carbono orgánico, seguida de colinas de diferentes clases.

Fernández Delgado (2019) cuantificó el carbono orgánico del suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca, en 10 parcelas a una profundidad de 30 cm. La concentración de carbono varió entre 87,81 hasta 967,84 Mg/ha, siendo la estimación ordinaria de 417,94 Mg/ha, evidenciando una alta concentración de carbono natural. Por consiguiente, es necesario y fundamental asegurar este frágil ecosistema a través de una gestión sustentable del suelo asignándole valor como sumidero de carbono, a la vez, favoreciendo la purificación y mejorando el abastecimiento de agua en el área.

Mondal (2017) determinó que la distribución espacial del stock de COS mediante la técnica de interpolación RK fue mayor en el área de vegetación (principalmente bosque), seguida de las tierras agrícolas, el más bajo se observa en los asentamientos humanos. La concentración de COS fue menor en áreas con pendiente alta y mayor en áreas de pendiente baja. Suelos con más vegetación, menor grado de pendiente y arcilloso tendrán un alto contenido de COS, en tanto suelos con menos vegetación, mayor grado de pendiente y arenoso conducirán a un bajo contenido de COS.

Para obtener un mejor resultado de la distribución del COS, se consideran varios tipos de predictores espaciales que tienen más control sobre la intensidad del COS. Algunos estudios en la India para mapeos digitales han utilizado técnicas como relaciones no lineales entre el carbono del suelo y factores ambientales como el bosque aleatorio (Sreenivas et al., 2016). Dentro de todas las metodologías empleadas para estimar la variabilidad espacial del carbono en el



suelo, las regresiones lineales múltiples y el Kriging ordinario destacan como las técnicas más frecuentemente aplicadas, en gran parte debido a su facilidad de interpretación y simplicidad en su utilización (Samper, 1990).

De manera análoga, se alcanzaron las predicciones más precisas (con errores de validación más bajos) mediante enfoques híbridos como el Kriging de regresión lineal (KRL) (Minasny et al., 2007). Los resultados de investigaciones que incorporan regresión ponderada geográficamente (GWR) y regresión kriging ponderada geográficamente (GWRK) sugieren que estas son opciones más adecuadas para capturar la heterogeneidad del paisaje en las predicciones de carbono del suelo. Estos enfoques tienen en cuenta la no estacionariedad al evaluar las relaciones locales entre el carbono del suelo y las variables ambientales, lo que puede variar en diferentes ubicaciones dentro de un área de un amplio estudio.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

Debido a la vasta cantidad de carbono almacenada en los suelos, una mínima modificación en las existencias de carbono del suelo puede tener un impacto sustancial en el ciclo global del carbono (CGC), en este sentido, una gestión cuidadosa del carbono del suelo podría contribuir a compensar algunas de las emisiones de origen antropogénico.

Desde un punto de vista conceptual, las reservas de carbono en el suelo se han dividido en distintas fracciones que varían en su grado de descomposición, abarcando desde aquellas que son menos accesibles hasta las que son más susceptibles a cambios (Huang y Wenjuan, 2006), y la magnitud de estas fracciones en relación con las características del perfil del suelo determinan la capacidad sumidero de carbono. La capacidad sumidero de carbono del suelo también se ve afectada por el tipo de suelo (textura, minerales arcillosos, profundidad, etc.), el uso y manejo de la tierra y el clima (Burke et al., 1989; Baldock y Skjemstad, 1999).

La variabilidad en la distribución espacial y las diferencias en las fracciones de carbono en el suelo dentro de una región climática determinada, tipo de suelo o prácticas de uso de la tierra pueden proporcionar información valiosa acerca de los procesos de captura de carbono. Por consiguiente, la evaluación de la distribución espacial de las reservas de carbono en el suelo en relación con el tipo de suelo, el uso de la tierra y las condiciones climáticas es esencial para comprender la dinámica del carbono en el suelo, el tiempo necesario para recuperarse, las emisiones de gases y la productividad agrícola.

Por lo general, la información sobre la distribución espacial del carbono en el suelo en un paisaje se adquiere mediante estudios de campo que pueden ser laboriosos y costosos. Tradicionalmente, esta información se representa a través de mapas de suelos que siguen un modelo discreto de variabilidad espacial. Estos mapas muestran polígonos en los cuales se considera que los suelos son uniformes, con límites marcados donde se producen cambios bruscos en las propiedades del suelo (Heuvelink y Webster, 2001). No obstante, la mejor manera de representar la heterogeneidad espacial de las propiedades

del suelo es mediante un modelo continuo de variabilidad espacial, en el cual estas propiedades cambian de manera constante en el espacio.

El rápido avance de tecnologías geoespaciales, como los Sistemas de Información Geográfica y la Percepción Remota, junto con la disponibilidad de conjuntos de datos ambientales de alta resolución, ha permitido enfoques más cuantitativos para predecir la variabilidad espacial del carbono en el suelo en función de los factores que influyen en la formación de los suelos (Zhu et al., 2015; Yang et al., 2016). Las técnicas de mapeo digital de suelos han capturado con éxito el efecto de diferentes factores ambientales como el uso de la tierra, el tipo de suelo, la litología, la topografía al tiempo que predicen las propiedades del suelo (Schulp y Verburg, 2009; D'Acqui et al., 2010).

2.2 Enunciados del problema

El análisis de la distribución espacial de las reservas de carbono en el suelo en relación con el tipo de suelo, el uso de la tierra y las condiciones climáticas es esencial para una comprensión completa de la dinámica del carbono en el suelo. Esto incluye aspectos como el tiempo medio de recuperación, las emisiones gaseosas y la productividad agrícola. Usualmente, la información acerca de la distribución espacial del carbono en el suelo en un paisaje se adquiere mediante estudios de campo que son laboriosos y costosos.

El problema general que se plantea ¿es viable determinar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo mediante modelamiento espacial y mapeo digital del suelo por superposición ponderado de uso de la tierra y variables medioambientales en la microcuenca Pacramayo en Puno? Los problemas específicos que se abordan son: ¿Es viable identificar las variables ambientales más significativas que influyen en el contenido de carbono orgánico del suelo? ¿Es posible determinar la distribución espacial de reservas de carbono orgánico del suelo utilizando el método geoestadístico Kriging Ordinario? ¿es viable determinar las reservas de carbono orgánico por modelamiento espacial por superposición ponderada?

Los problemas específicos se centran en aspectos clave para comprender la distribución y los factores que influyen en el contenido de carbono orgánico del suelo en la región de estudio. La aplicación de Kriging Ordinario y el análisis de variables ambientales son enfoques importantes para abordar estas cuestiones.

2.2.1 Problema general

- ¿Es factible estimar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Pacramayo – Puno, utilizando Kriging Ordinario a través de modelamiento y mapeo digital del suelo, empleando la superposición ponderada de variables ambientales y el uso de la tierra?

2.2.2 Problemas específicos

- ¿Es probable identificar las variables ambientales representativas en la determinación del carbono orgánico del suelo?
- ¿Es viable estimar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo mediante el método geoestadístico de Kriging Ordinario?
- ¿Es posible modelar el carbono orgánico del suelo mediante la superposición ponderada de variables ambientales y el uso de la tierra?

2.3 Justificación

El suelo como recurso natural del medio ambiente, donde la práctica de la agricultura y ganadería involucra aplicaciones de abonos orgánicos y fertilizantes químicos, que repercute de manera favorable y/o desfavorable en la conservación de este recurso, considerándose que siempre ha sido una alternativa para obtener mejores ingresos económicos, quedando de lado la importancia del uso y la sostenibilidad del recurso suelo bajo las condiciones de equilibrio ambiental y la práctica de la agricultura conservacionista.

El carbono en el suelo puede existir en dos formas principales: inorgánica y orgánica. El carbono inorgánico proviene de las rocas o se encuentra en forma mineral, como el carbonato de calcio (CaCO_3) atrapado en su forma mineral. El carbono inorgánico suele ser menos susceptible a la pérdida en comparación con el carbono orgánico. El carbono orgánico del suelo representa el componente principal de la materia orgánica presente en el suelo. Esta materia orgánica se forma a través de procesos de descomposición física, química y biológica de materiales orgánicos que ingresan al sistema del suelo.

El carbono orgánico total del suelo desempeña un papel fundamental en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Además, se considera una variable ambiental crucial debido a su función como reservorio de carbono en la superficie de la Tierra. La disponibilidad de información sobre la distribución espacial del carbono orgánico en el suelo, así como sobre la influencia de las variables ambientales y el uso de la tierra en el contenido de carbono orgánico, aún es limitada en el Altiplano de Puno.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- Estimar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Pacramayo-Puno, es factible utilizando Kriging Ordinario, a través del modelamiento y mapeo digital del suelo, empleando la superposición ponderada de variables ambientales y el uso de la tierra.

2.4.2 Objetivos específicos

- Identificar variables ambientales representativas en la determinación de carbono orgánico del suelo.
- Estimar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo mediante el método geoestadístico de Kriging Ordinario.
- Modelar el carbono orgánico del suelo por superposición ponderada de variables ambientales y uso de la tierra.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- La estimación de la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Pacramayo - Puno es factible mediante modelamiento espacial y mapeo digital, utilizando una superposición ponderada del uso de la tierra y variables ambientales.



2.5.2 Hipótesis específicas

- Es probable identificar las variables ambientales representativas en la determinación del carbono orgánico del suelo
- La estimación de la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo es viable mediante el método geoestadístico Kriging Ordinario.
- Es posible modelar el carbono orgánico del suelo mediante la superposición ponderada de variables ambientales y el uso de la tierra.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

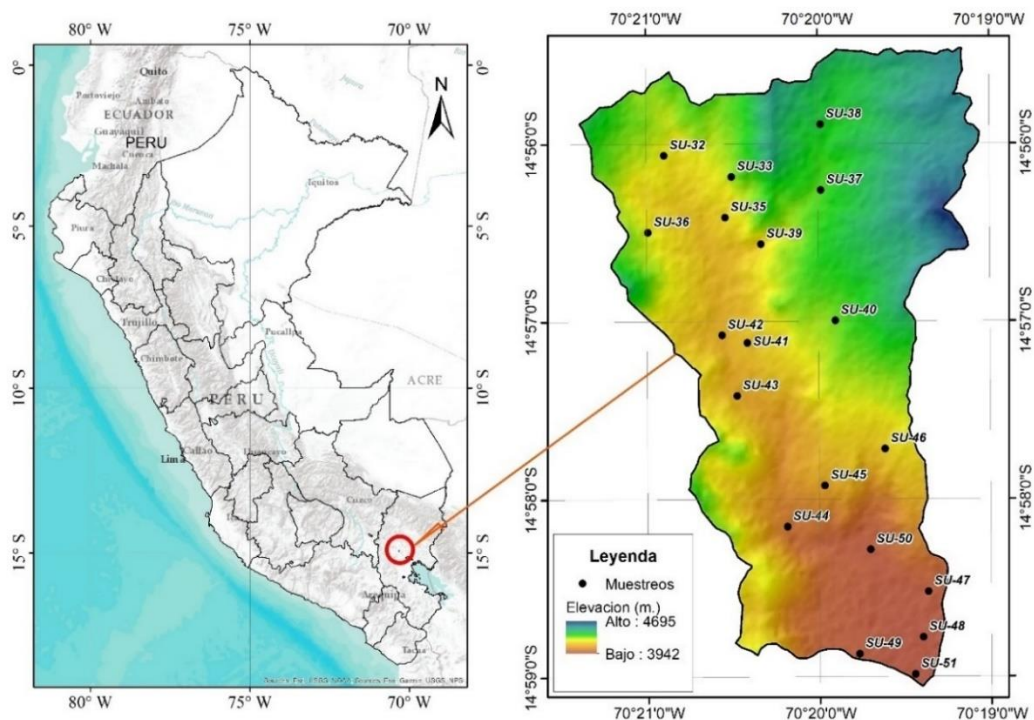
El estudio se llevó a cabo en la Microcuenca Pacramayo, jurisdicción del distrito José Domingo Choquehuanca, provincia de Azángaro, ubicada en el departamento de Puno. Las coordenadas UTM WGS84 son 19S N=8346000 m y E=356000 m. Esta área se encuentra en el ecosistema altoandino del Perú y abarca una extensión de 1,731.63 hectáreas. Las altitudes en el área de estudio varían desde los 3,942 hasta los 4,695 metros sobre el nivel del mar, la precipitación anual promedio oscila entre 689 y 824 mm, y la temperatura media varía de 5.6 a 8.2°C. La microcuenca Pacramayo se encuentra en la zona de vida bosque húmedo-Montano subtropical (bh-MS). La actividad principal en esta área es la ganadería y la agricultura.

Debido a las condiciones climáticas frías y subhúmedas predominantes en la microcuenca, la vegetación es variable. En zonas de mayor altitud, las especies preponderantes son el Ichu (*Stipa ichu*) y el Chiji (*Muhlenbergia ligularis*), mientras que, en la zona intermedia, es común encontrar el crespillo (*Calamagrostis vicunarum*) y el Ichu (*Stipa ichu*). En las áreas más bajas, que experimentan una mayor actividad humana y uso variado del suelo, se destacan especies como el Tisna Ichu (*Stipa obtusa*) y la chilligua (*Festuca dolichophylla*), junto con cultivos como avena forrajera, alfalfa y papa.

En cuanto a la geología de la región, esta se caracteriza por su origen en el periodo Cuaternario y Cretácico. La composición geológica incluye depósitos sedimentarios como calizas, dolomitas, arenas arcillosas y conglomerados, además de rocas ígneas como depósitos volcánicos y granito, según lo descrito por (De la Cruz, 1995).

Figura 1

Ubicación de la Microcuenca Pacramayo y puntos de muestreo del suelo



3.2 Población

La zona de estudio incluye diversos tipos de suelos a diferentes profundidades en la microcuenca del río Pacramayo, situada entre las coordenadas UTM WGS84 19S N=8346000 m y E=356000 m, abarcando una extensión de 1,731.63 hectáreas.

3.3 Muestra

La muestra está conformada por 20 perfiles de suelos debidamente ubicadas dentro del área de la microcuenca Pacramayo, obtenidas según el método de selección de muestreo, establecidas en el Decreto Supremo N° 013-2010-AG, que permitió examinar los horizontes del suelo en su estado natural y determinar el contenido de carbono orgánico del suelo.

3.4 Método de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, no experimental tipo descriptivo y transversal en el tiempo. Por otro lado, para evaluar la variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico (COS) se han seleccionado 20 puntos de muestreo por mapeo libre, distribuidas en todo el espacio de la microcuenca para obtener una

representación significativa de la variabilidad espacial, según las normas de estudio de suelos.

Los datos climatológicos de precipitación y temperatura, así como la información cartográfica utilizada en el estudio, se obtuvieron de diversas fuentes y páginas en línea, como se detalla en la Tabla 1. Además, la Figura 2, ilustra el flujograma de la metodología que se siguió para determinar el modelamiento y la variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico del suelo (COS).

Tabla 1

Información climática y cartográfica

Información	Tipo de dato	Resolución espacial (m)	Fuente	Link
Modelo Digital de Elevación	Ráster	12.5	Open Science Earthdata (NASA)	ASF Data Search (https://www.alaska.edu ; accessed on 4 February 2023)
Imagen Satelital Landsat (Bandas 4 y 5)	Ráster	30	USGS, 2021	EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/ ; accessed on 10 February 2023)
Precipitación (mm) y temperatura (°C)	Ráster	100	(SENAMHI, 2021)	https://www.gob.pe/senamhi i accessed on 8 March 2023

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

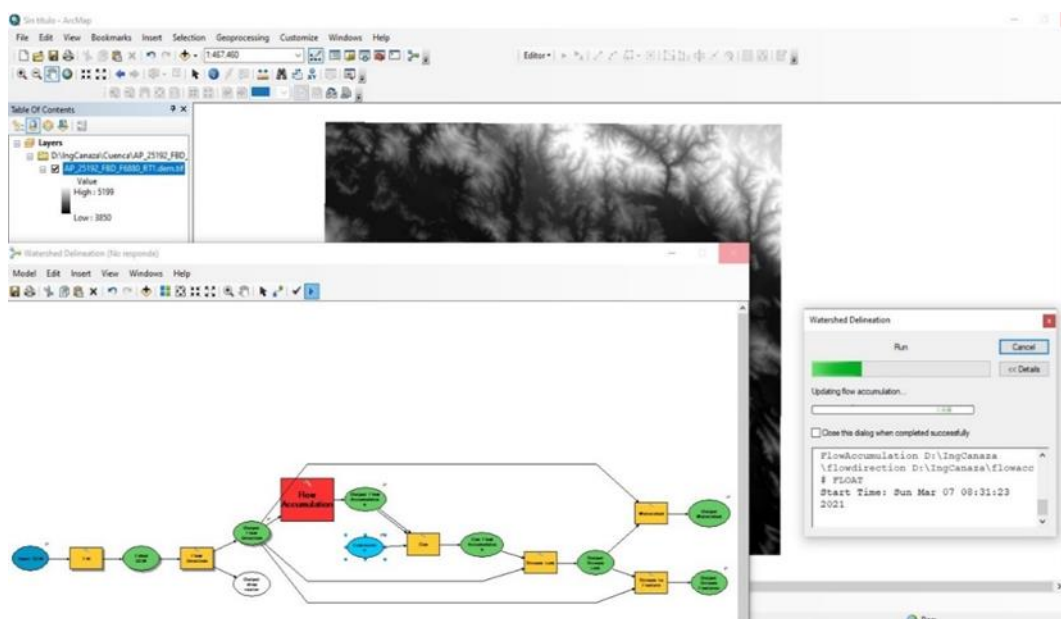
Considerar en la presentación de la metodología: a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos, b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros y c) Aplicación de prueba estadística inferencial.

3.5.1 Delimitación de la microcuenca

Se realizó mediante la aplicación de herramientas del ArcToolbox del software ArcMap, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) de 12.5 m de resolución espacial obtenido de <https://www.alaska.edu> (Figura 2)

Figura 2

Modelo de delimitación de la microcuenca hidrográfica con la herramienta ArcToolbox – hydrology model builder – ArcMap



3.5.2 Método de muestreo para cuantificar carbono orgánico del suelo (COS)

El método de selección de los puntos de muestreo se basó en el mapeo libre, siguiendo las pautas establecidas en el Decreto Supremo N° 013-2010-AG, publicado en 2010. En este proceso, se excavaron un total de 20 calicatas en los puntos de muestreo seleccionados, lo que permitió examinar los horizontes del perfil del suelo en su estado natural, como se ilustra en la Figura 3. El número de puntos de muestreo se determinó utilizando la Ecuación 3.1.

$$(\text{Numero de puntos} = \frac{0.30 * \text{Area (ha)}}{100} * 2) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Con la finalidad de diseñar y realizar el muestreo sistemático en los puntos seleccionados en el mapa base, se tomó una muestra única de dos kilogramos de suelo por horizonte. La mitad de esta muestra fue separada para el análisis

fisicoquímico y la otra mitad para determinar el factor de corrección por pedregosidad. Además, se ha georreferenciado las coordenadas en cada punto con un dispositivo llamado sistema de posicionamiento global (GPS), se registró el uso del suelo y tipo de manejo en cada punto de muestreo.

Las muestras de suelos fueron secadas a temperatura ambiental y a la sombra, luego enviados al laboratorio para el respectivo análisis físico y químico. La materia orgánica fue determinada por el método de (Walkley y Black, 1934) basada en la oxidación de carbono orgánico del suelo. Este procedimiento detecta entre el 70 y 84% de carbono orgánico total, por lo cual es necesario introducir un factor de corrección, que puede variar entre suelo y suelo. El carbono orgánico del suelo (COS), se determinó dividiendo el resultado de la materia orgánica (%MO) entre el factor de Van Benmelen (1.724137931), que resulta del supuesto que la MO contiene un 58 % de Carbono Orgánico (Ecuación 2).

$$\%COS = \left(\frac{\%MO}{1.724137931} \right) * 0.01. \quad (\text{Ecuación 2})$$

Las reservas de carbono orgánico $COS_{(r)}$ se determinó con la fórmula de (Penman y Kruger, 2003), para suelos minerales (Ecuación 3).

$$COS_{(r)} = p * DA * CO * FC_{pd} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- $COS_{(r)}$ = reserva de carbono orgánico del suelo del horizonte o espesor de capa (kg/m^2)
- CO = concentración de carbono orgánico, obtenida de análisis de laboratorio (g/g de suelo)
- p = profundidad del horizonte o espesor de la capa (m),
- DA = densidad aparente del suelo (kg/m^3)
- FC_{pd} = Factor de corrección de pedregosidad (1 - % piedras) /100), representa partículas mayores a 2 mm en la capa (gravas y piedras).

Figura 3

Lectura y muestreo de un perfil del suelo



3.5.3 Distribución espacial de COS por el método de Kriging Ordinario (KO)

Comprender la distribución espacial de carbono orgánico del suelo (COS) es crucial para el manejo sostenible de los suelos en los ecosistemas montañosos de los Andes peruanos. La metodología consistió en evaluar 53 muestra de suelo provenientes de 20 perfiles de suelos, clasificadas en 3 rangos de profundidad: 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm. Se evaluaron 19 muestras de suelos de 0-20 cm de profundidad, 15 muestras de 20-45 cm y 19 muestras de 45-105 cm de profundidad, distribuidas en el espacio de la microcuenca, hasta 105 cm de profundidad del suelo. Estas muestras representan las diferentes capas de suelo y se utilizaron para analizar la variabilidad espacial del COS en cada una de estas profundidades.

Para realizar el mapeo de la variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico del suelo (COS), se empleó el método geoestadístico espacial de Kriging Ordinario. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado por diversos investigadores y es altamente recomendado para evaluar la variabilidad espacial

del COS. En el contexto de esta investigación, se generaron tres mapas temáticos de carbono orgánico del suelo correspondientes a las tres profundidades. A continuación, se proporciona una descripción del método de interpolación espacial de Kriging Ordinario que se utilizó en este estudio.

El método de interpolación espacial de KO encuentra la mejor estimación lineal de una variable aleatoria con estacionalidad de segundo orden, con una media desconocida constante, mediante la Ecuación 4)

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde $\hat{Z}(x_0)$ = Es el valor estimado por Kriging en un punto sin muestrear (x_0); $Z(x_i)$ un valor real en un punto ecino x_i ; y λ_i el peso del factor $Z(x_i)$.

Su error de estimación $R(x_0)$, está dado por la Ecuación 5)

$$R(x_0) = \hat{Z}(x_0) - Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0) \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde $Z(x_0)$ es el valor verdadero en el punto x_0 .

En este enfoque, se construye un solo semivariograma utilizando todos los datos, lo que proporciona una descripción de la estructura de la correlación espacial en toda la región de estudio. Asumiendo la estacionariedad del proceso, la predicción está limitada a las observaciones en el vecindario de cualquier punto desconocido y sus ponderaciones son obtenidas al minimizar su error de predicción bajo una condición sin sesgo (Cressie, 1991). La varianza de la predicción $\sigma^2(x_0)$ (el error cuadrado medio minimizado), es calculada en cada locación mediante la Ecuación 6.

$$\sigma^2(x_0) = \Psi + \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde Ψ es el multiplicador de Lagrange y $\gamma()$ es el modelo del semivariograma.

El método de Kriging Ordinario supone una media constante desconocida, los puntos de datos necesitan ser muestreados de un fenómeno que es continuo en el espacio. Los parámetros importantes incluyen una transformación adecuada, una posible superficie de eliminación de tendencia, modelos de covarianza,

semivariograma y búsquedas similares. La herramienta de análisis geoestadístico del Arc Map permite aplicar transformaciones a los datos para ayudar que las varianzas sean más constantes y a la normalización de datos; en este caso se aplica la transformación logarítmica a los datos de carbono orgánico medido, condición más próxima a una distribución normal.

3.5.4 Procesamiento de datos de precipitación y temperatura

La precipitación y la temperatura son factores ambientales clave que influyen en las reservas de COS en los Andes del Perú. Estos dos elementos tienen efectos directos e indirectos en la cantidad y la calidad del carbono orgánico almacenado en el suelo. La precipitación afecta la disponibilidad de agua en el suelo, lo cual es fundamental para la descomposición de los residuos orgánicos y la actividad microbiana. Un aumento en la precipitación puede incrementar la descomposición de la materia orgánica, lo que resulta en una liberación de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. Sin embargo, una precipitación adecuada también puede estimular la producción primaria de biomasa vegetal, lo que aumenta la entrada de carbono orgánico al suelo. La falta de precipitación puede limitar la descomposición microbiana y la producción de biomasa, reduciendo así las reservas de carbono orgánico del suelo mientras la temperatura influye en los procesos biológicos y químicos en el suelo. Las bajas temperaturas tienden a ralentizar la descomposición de la materia orgánica, lo que puede resultar en la acumulación de carbono orgánico en el suelo a largo plazo. Por otro lado, las altas temperaturas aceleran la descomposición y pueden aumentar las tasas de mineralización del carbono orgánico. Esto significa que, en regiones con temperaturas más cálidas, es posible que se libere más CO_2 al ambiente debido a la descomposición acelerada.

La información utilizada corresponde al portal web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), actualizada al 01 de julio del 2021, comprende al periodo de 1981-2010. La información se descargó en formato ráster a una resolución espacial de 100 m, cada pixel contiene información climatológica de variables de precipitación y temperatura. Para el modelamiento y determinar la variabilidad espacial de las reservas de carbono

orgánico del suelo (COS) se utilizó la precipitación y temperatura promedio multianual.

3.5.5 Procesamiento de imagen Landsat 8 OLI y NDVI

La cobertura vegetal es una variable medioambiental y es muy importante para determinar las reservas de COS mediante el modelamiento de superposición ponderada y obtener el mapeo de la variabilidad espacial del COS, y para obtener esta variable se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el procedimiento es definido como un parámetro para calcular a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert y García-Haro, 1997).

Para procesar el NDVI se realizó a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI con operaciones algebraicas de las bandas espectrales 4 y 5 y resolución espacial de 30m.

Para obtener el mapa temático de cobertura vegetal NDVI se utilizó la Ecuación 7.

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

- IR = valores de píxel de la banda infrarroja
- R = valores de píxel de la banda roja.

3.5.6 Clasificación de cobertura y uso actual de la tierra

El uso actual de la tierra en los Andes del Perú desempeña un papel crucial en las reservas de carbono orgánico del suelo. El modo en que se gestionan y se utilizan las tierras puede tener impactos significativos en la cantidad y calidad del carbono orgánico almacenado en el suelo. Para determinar el uso actual de tierras para el área de estudio se ha utilizado el método de Corine Land Cover (CLC), que es un sistema de clasificación de cobertura de tierras que proporciona información detallada sobre los diferentes tipos de uso del suelo y la vegetación. Para obtener el mapa temático de uso de suelos por el método de CLC existe un reglamento adaptado para el Perú y estos están disponibles en organismos

gubernamentales, instituciones de investigación geoespaciales de nuestro país, para nuestro estudio se han determinado diferentes clases de uso de suelos como áreas urbanas y rurales, cultivos agrícolas, pastizales, humedales, pajonales entre otros. Cada clase de cobertura de tierras tendrá un impacto diferente en las reservas de carbono orgánico del suelo.

3.5.7 Correlación de Pearson de COS entre variables ambientales y climatológicas

Para evaluar el grado de asociación lineal entre el contenido de COS y las variables que explican la distribución y variabilidad espacial, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson, que es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas, varía de +1 y -1. El valor 0 indica que no existe asociación entre dos variables, valores > 0 indican una asociación positiva, es decir a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra; un valor < 0 indica relación negativa, es decir a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye. El coeficiente de correlación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariado conjunta, se define con la Ecuación 8.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Por regla general, en la regresión lineal se utiliza el error cuadrático medio, para una regresión lineal con una sola variable X, se calcula con la Ecuación 9.

$$y = a + bx \quad (\text{Ecuación 9})$$

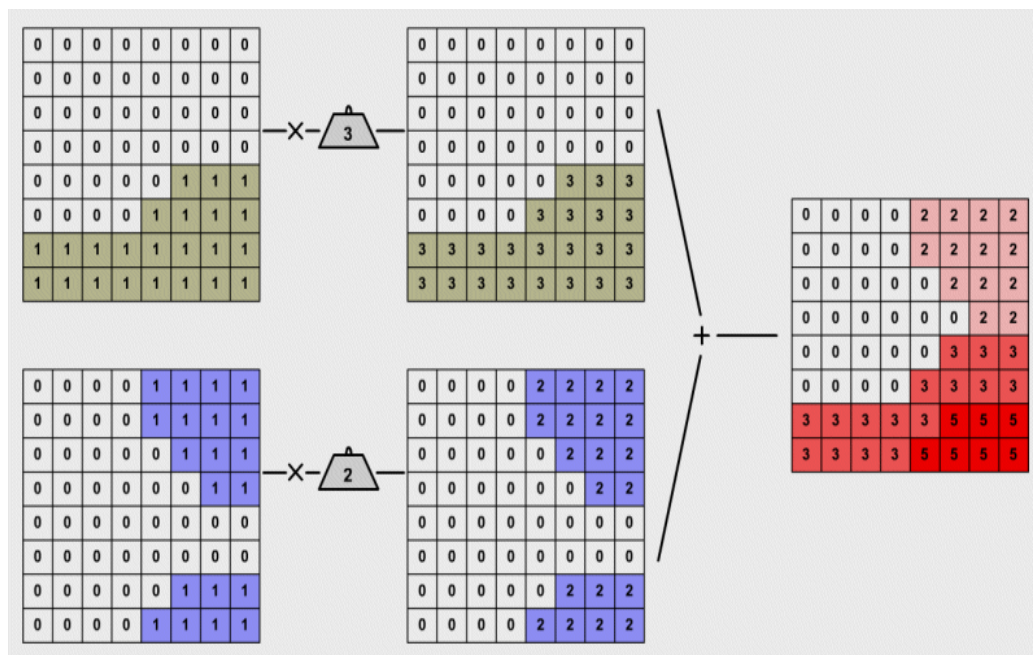
3.5.8 Metodología Superposición pondera en ArcMap

El método Weighted Overlay (Superposición ponderada) fue utilizado para el modelamiento de la variabilidad espacial de COS (Figura 5), este método de ponderación es muy aplicado para evaluar la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo, en este caso se ha combinado y ponderado con 5 diferentes capas de datos relevantes en formato ráster como COS, precipitación, temperatura, pendiente y uso actual de suelos y cada variable se ha asignado un

peso en (%) de acuerdo a la importancia y sensibilidad del incremento natural del COS. El análisis de superposición ponderada para identificar las ubicaciones adecuadas utiliza una escala de 1 a 9, donde 9 representa la mejor y 1 la peor idoneidad para cada categoría.

Figura 4

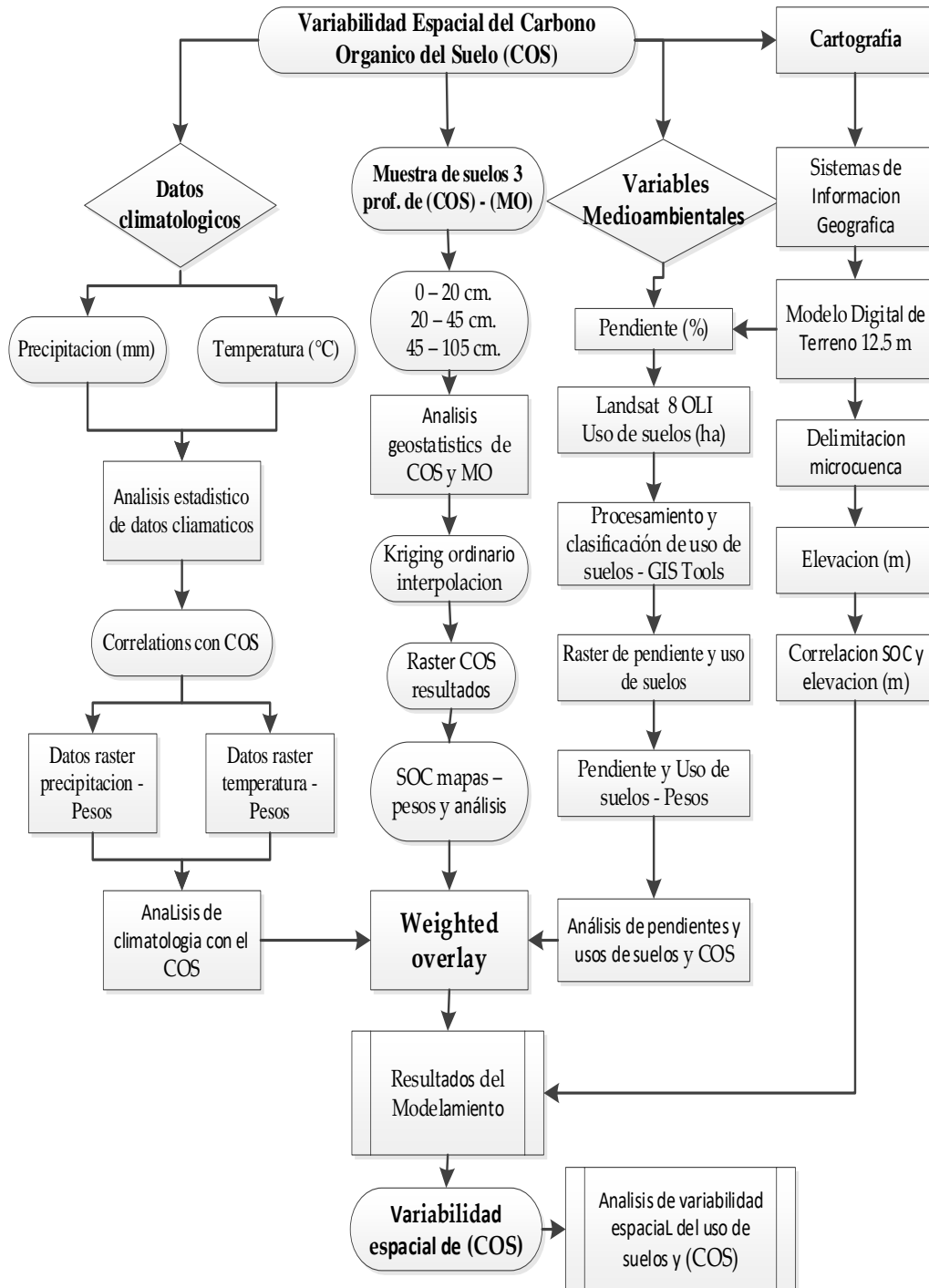
Esquema de superposición ponderada para el modelo ráster



Nota. <http://www.gitta.info/Suitability/en/html/WeightOverlalearningObject1.html>

Figura 5

Flujograma de la metodología y procedimientos para determinar la variabilidad espacial del COS



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Variables ambientales en la determinación de carbono orgánico del suelo (COS)

Las variables ambientales juegan un papel fundamental en la determinación del carbono orgánico del suelo (COS). Estas variables influyen en la acumulación, pérdida y distribución del COS. Las variables más importantes incluyen la precipitación, la temperatura, el uso del suelo, el tipo de vegetación, la altitud, el drenaje, la humedad del suelo, los microorganismos del suelo y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Comprender cómo estas variables interactúan y afectan los niveles de COS es esencial para la gestión sostenible de los suelos y la captura de carbono, especialmente en el contexto del cambio climático y la conservación de los recursos naturales.

A. Determinación de COS) en los puntos de muestreo

En la Tabla 2, se muestran los resultados de laboratorio respecto al contenido de materia orgánica del suelo (MOS) y carbono orgánico del suelo (COS). También se incluyen datos de variables climatológicas, como la precipitación media anual, la temperatura media anual y la altitud. Estos datos fueron recopilados para cada ubicación de muestreo en las calicatas, empleando el método de extracción a partir de los píxeles de mapas temáticos en formato ráster.

El objetivo es analizar la correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y las variables ambientales. El contenido de COS varía desde 1.89 kg/m² a una altitud de 3971 metros hasta 6.87 kg/m² a una altitud de 4242 metros a 20 cm de profundidad. Estos resultados indican que las mayores reservas de COS se encuentran a altitudes más elevadas. La precipitación pluvial presenta un comportamiento similar a la altitud; es decir, a mayor precipitación, el contenido de COS es mayor.

Sin embargo, la temperatura muestra un comportamiento inverso, ya que a menores temperaturas se registra un aumento en la cantidad de COS.

Tabla 2

Contenido de COS y variables ambientales a diferentes profundidades

Código	Ubicación - UTM		Variables				COS (Kg/m ²)		
	Este (m)	Norte (m)	Pp. (mm)	Temp. (°C)	Altitud (m)	MOS (%)	0-20 cm	20-45 cm	45-105 cm
SU-30	355,363	8,347,490	764.55	6.55	4113	3.14	-	-	13.37
SU-32	355,002	8,348,489	738.64	7.53	4403	6.54	6.27	1.95	1.45
SU-33	355,708	8,348,268	755.10	6.86	4233	3.79	6.03	-	-
SU-35	355,641	8,347,846	764.37	6.47	4292	2.88	4.12	3.35	1.62
SU-36	354,838	8,347,688	742.34	7.02	4349	3.14	3.45	-	0.19
SU-37	356,642	8,348,136	732.60	7.20	4189	4.44	3.78	2.32	4.60
SU-38	356,635	8,348,817	717.74	7.31	4242	6.73	6.87	1.68	2.95
SU-39	356,016	8,347,571	726.80	6.98	4192	2.03	2.84	4.18	11.14
SU-40	356,794	8,346,781	754.93	6.41	4320	3.20	3.76	2.33	1.10
SU-41	355,876	8,356,548	719.53	7.33	4151	6.99	6.60	2.7	1.02
SU-42	355,611	8,346,625	725.68	7.13	4124	6.67	6.16	2.98	1.80
SU-43	355,771	8,345,996	714.14	7.30	4112	3.20	4.37	0.80	0.94
SU-44	356,297	8,344,639	733.68	7.07	4174	5.10	3.76	0.91	0.29
SU-45	356,688	8,345,069	717.29	7.32	4103	6.21	6.41	1.18	0.79
SU-46	357,315	8,345,451	705.97	7.85	4031	2.29	2.77	3.08	1.97
SU-47	357,772	8,343,974	695.25	7.84	3968	2.75	3.58	-	0.17
SU-48	357,772	8,343,501	692.71	7.86	3968	2.94	3.73	-	1.31
SU-49	357,054	8,343,322	690.91	8.07	3950	2.94	3.24	0.79	0.84
SU-50	357,167	8,344,407	695.18	8.14	3971	1.90	1.89	1.33	4.40
SU-51	357,637	8,343,113	691.88	8.17	3943	2.94	3.95	1.30	3.50

B. Correlación de carbono orgánico del suelo (COS) con variables ambientales

El análisis estadístico de datos se realizó mediante el uso de la correlación de Pearson (r), que es una prueba estadística paramétrica, con un nivel de significación del 95% ($p < 0,05$). El contenido de carbono orgánico del suelo COS se correlacionó con variables ambientales como la precipitación, temperatura, materia orgánica del suelo y elevación.

Tabla 3

Correlación Pearson (r) entre el COS y variables ambientales a diferentes profundidades del suelo

Variable	0 - 20 cm	20 - 45 cm	45 - 105 cm
Precipitación (mm)	0,388	0,368	-0,140
Temperatura (°C)	-0,318	-0,374	0,293
Materia Orgánica (%)	0,592	-0,105	-0,091
Elevación (m)	0,402	0,366	-0,176

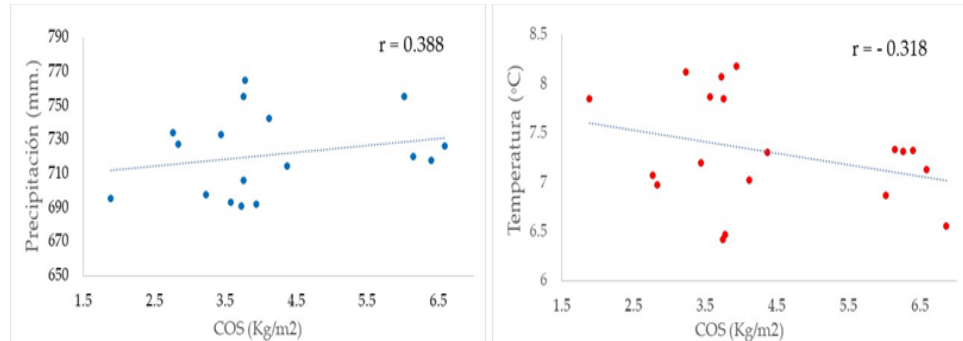
La precipitación desempeña un papel crucial en el desarrollo y la productividad de las plantas. La disponibilidad adecuada de agua permite que las plantas realicen la fotosíntesis y produzcan materia orgánica, lo que contribuye, en última instancia, a la acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS). En la Tabla 3 y Figuras 6a y 7a el coeficiente de correlación lineal de Pearson muestra una asociación positiva ($r=0,388$ y $r=0,368$) entre la precipitación y el nivel de carbono orgánico del suelo (COS) hasta 45 cm de profundidad del suelo.

Estos hallazgos corroboran la tendencia positiva de que un incremento en la precipitación está vinculado a una mayor acumulación de carbono orgánico del suelo (COS), fundamentalmente en las capas superficiales del suelo. Sin embargo, a mayores profundidades, el contenido de carbono orgánico decrece.

La Tabla 3 y la Figura 6c presentan datos que evidencian la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y la materia orgánica del suelo. La correlación entre el COS y la materia orgánica del suelo es positiva ($r = 0,592$) en el intervalo de 0 a 20 centímetros de profundidad. En términos generales, esto sugiere que el contenido de carbono orgánico del suelo tiende a aumentar a medida que se incrementa el contenido de materia orgánica, especialmente en la capa superior del suelo (Tabla 3 y Figuras 7c y 8c).

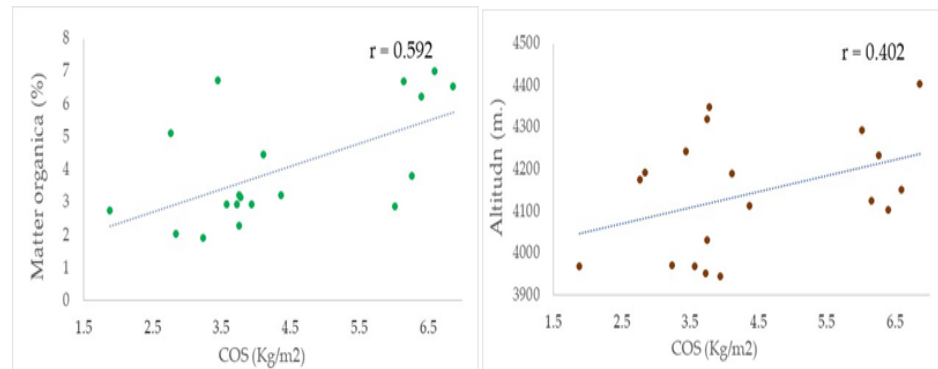
Figura 6

Correlación de Pearson a 0-20 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MOS y d) COS y Elevación



(a)

(b)

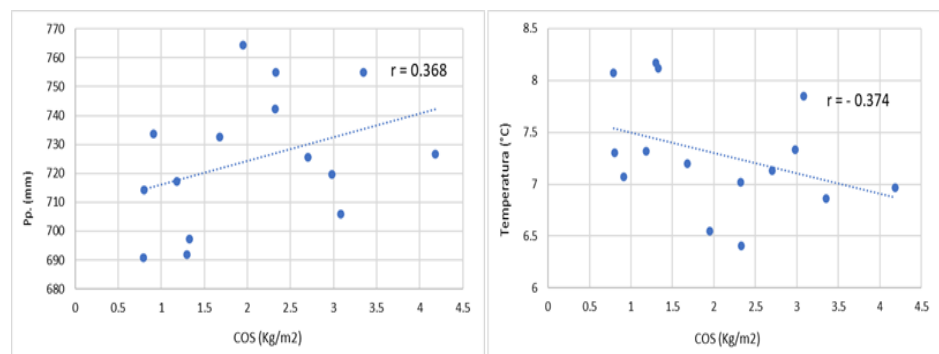


(c)

(d)

Figura 7

Correlación de Pearson 20-45 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MO y d) COS y elevación



(a)

(b)

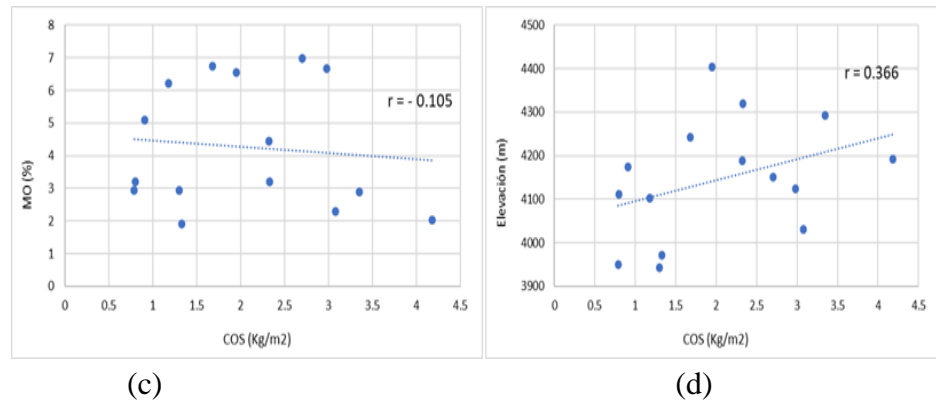
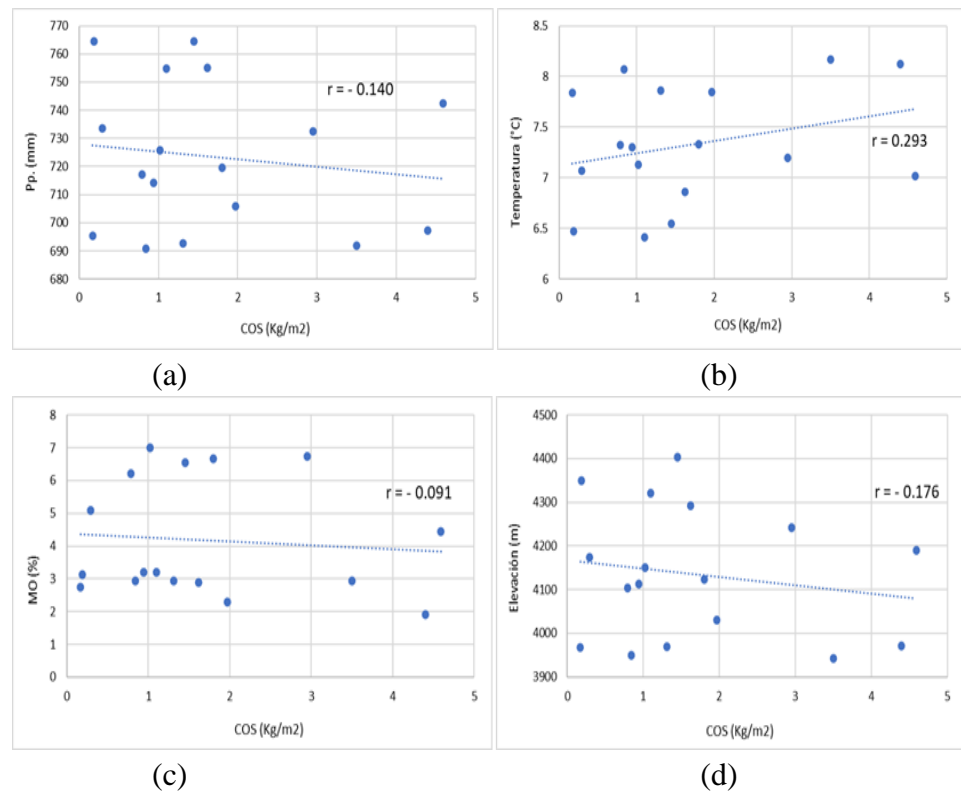


Figura 8

Correlación de Pearson 45-105 cm de profundidad entre: a) COS y precipitación, b) COS y temperatura, c) COS y MO y d) COS y elevación



En la Tabla 3 y las Figuras 6d y 7d se muestran relaciones lineales positivas entre el carbono orgánico del suelo (COS) y la elevación, con un coeficiente de correlación de 0,402 en el rango de 0 a 20 centímetros de profundidad, y una correlación positiva con un coeficiente de 0,366 en el rango de 20 a 45 centímetros de profundidad. Esto indica que a medida que la altitud aumenta, también lo hace el contenido de COS en el suelo hasta de 45 cm de profundidad.

La Figura 9 muestra la distribución espacial de los datos ráster de la precipitación media anual en milímetros, evidenciando un aumento de la precipitación a mayores altitudes en la microcuenca.

La Figura 10 presenta la variabilidad espacial de los datos ráster del mapa de temperatura media anual en grados Celsius, donde se observan temperaturas más altas en las zonas más bajas de la microcuenca, en esta zona se cultivan papa amarga, avena forrajera y alfalfa.

Finalmente, la Figura 11 muestra el mapa de pendientes con predominancia de 25-50%, revelando las irregularidades en la topografía del terreno. Todos estos parámetros influyen en el contenido de carbono orgánico del suelo.

Figura 9

Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de precipitación media anual

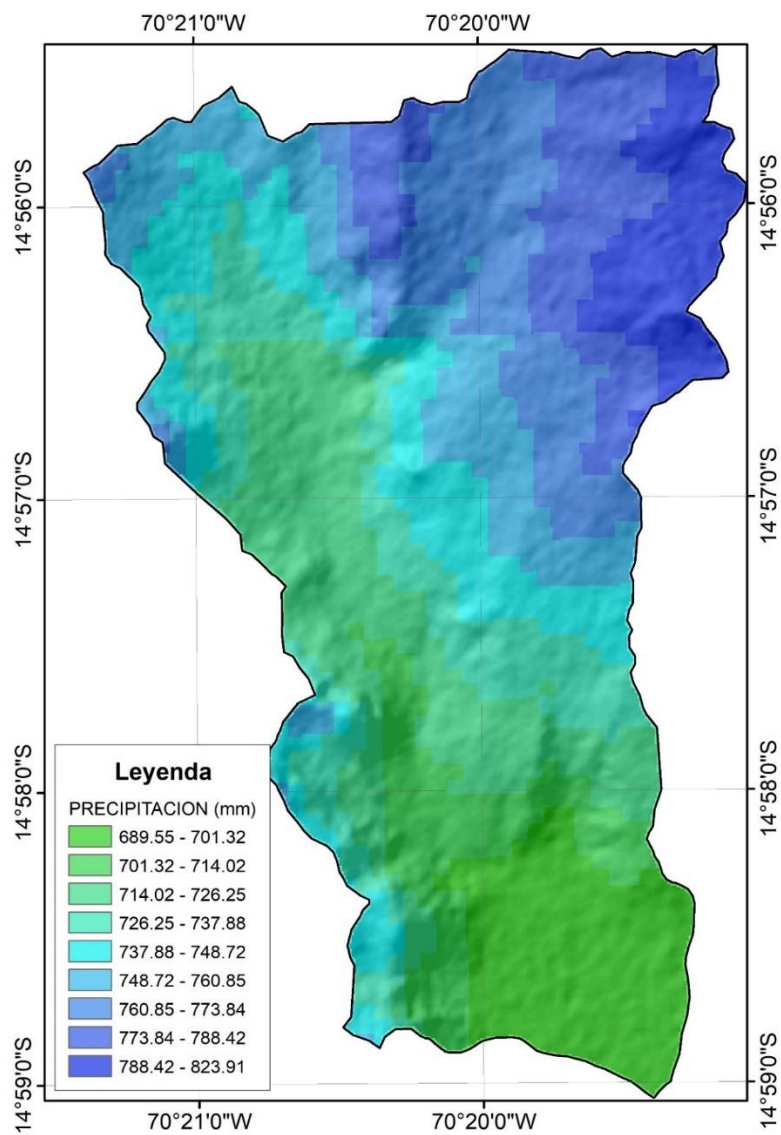


Figura 10

Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de temperatura media anual

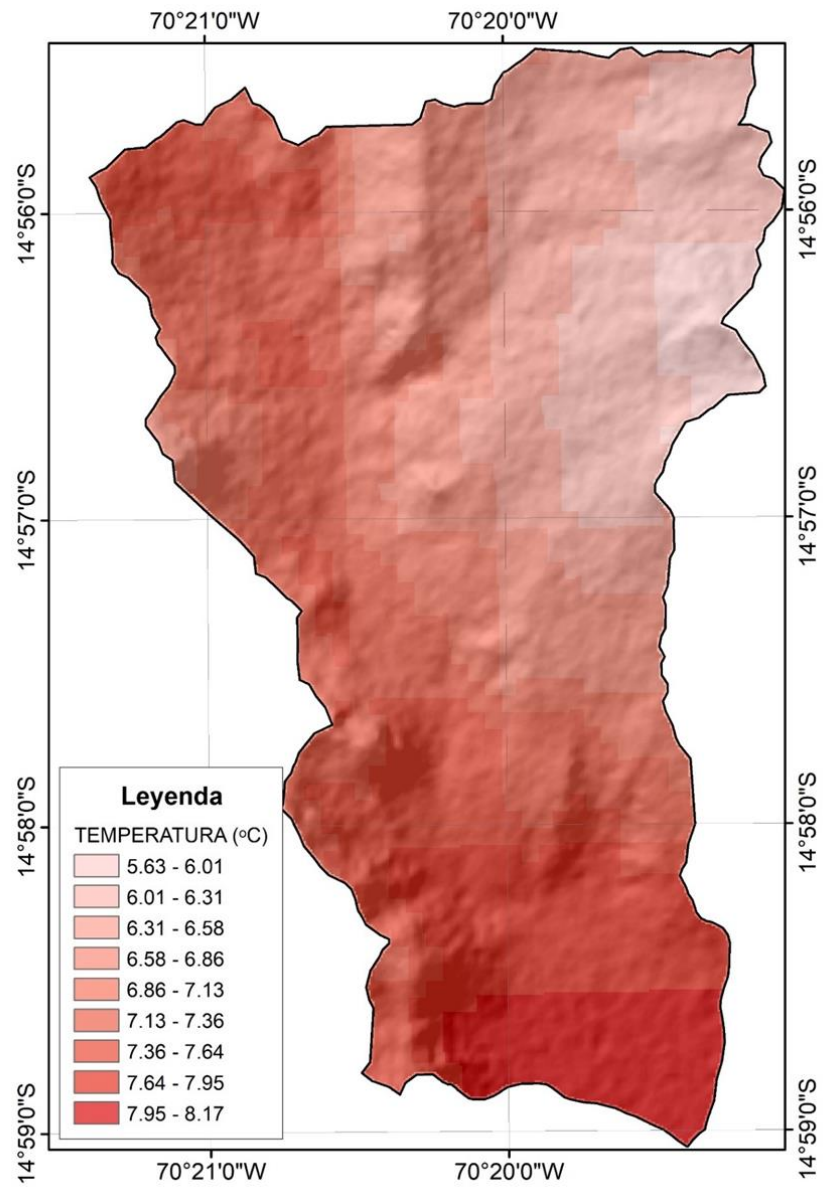
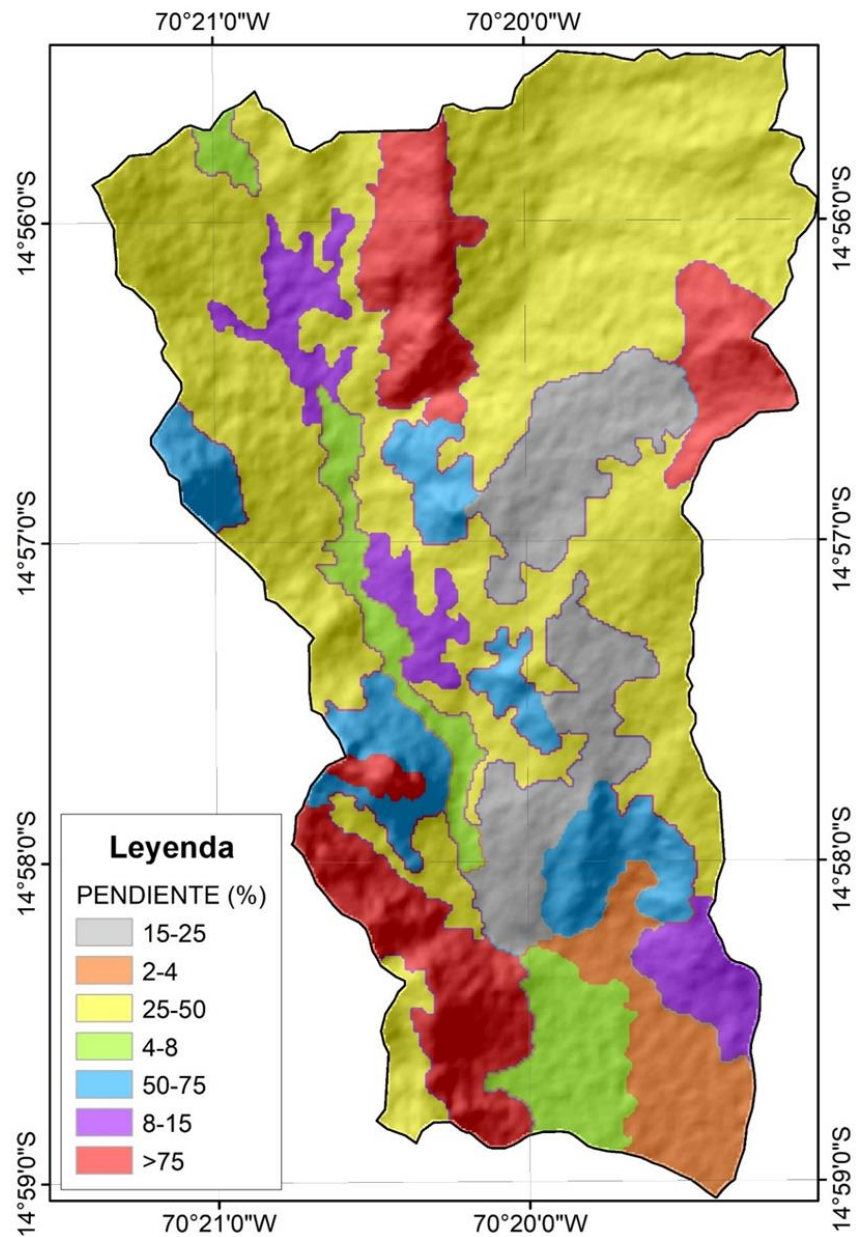


Figura 11

Variabilidad espacial de datos ráster de mapa de pendientes



4.1.2 Variabilidad espacial de reservas de carbono orgánico del suelo (COS) por Kriging Ordinario (KO)

Las condiciones ambientales, como el clima, la temperatura, la humedad y la precipitación, desempeñan un papel importante en la acumulación y descomposición del carbono en los suelos y en la vegetación.

El uso de la tierra, como la agricultura, la deforestación o la urbanización, pueden alterar significativamente las reservas de carbono. La conversión de

bosques en tierras de cultivo o áreas urbanas suele resultar en la pérdida de carbono almacenado en la vegetación y el suelo. Por otro lado, las prácticas de manejo sostenible o la reforestación pueden aumentar las reservas de carbono. La gestión adecuada de estos factores es fundamental para mantener y aumentar las reservas de carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático, ya que el carbono almacenado en los suelos y la vegetación actúa como un sumidero de carbono importante en el ciclo global del carbono.

A. Análisis de semivariograma de COS

En la Figura 12, se muestran las tendencias de COS de 0-20 cm de profundidad y nos permite visualizar cada dato de COS que se ubica en el plano XY y su valor se representa como una altura en la dimensión Z. La línea de tendencia sobre el plano XZ nos muestra la variación de los valores de COS de Oeste a Este. En el presente estudio el COS parece descender a medida que nos desplazamos hacia el Este, aunque presentan un pequeño repunte en el extremo más oriental.

La línea de tendencia sobre el plano YZ representa la variación a lo largo de un eje Norte al Sur. En este caso podemos apreciar que tenemos una mayor dispersión de los datos, y que las concentraciones de COS tienden a disminuir conforme nos desplazamos hacia el Sur. Por lo tanto, nuestro análisis de tendencias revela que los valores de COS presentan una tendencia creciente al desplazarnos hacia el Oeste y en mayor medida, en dirección Norte. De igual forma para las profundidades de 20-45 cm y de 45-105 cm el comportamiento de la tendencia de las reservas de COS es similar al de 0-20 cm de profundidad.

Las Figuras 13 y 14 revelan la variación espacial de la concentración de COS, esencial para la agricultura. Según el suelo, se requieren diferentes enfoques: agricultura intensiva con alta concentración de COS, abonos en suelos con baja concentración y riego en áreas con alta variabilidad de COS. El semivariograma ayuda a gestionar eficientemente las tierras, promoviendo un manejo agrícola sostenible y productivo.

Figura 12

Análisis de tendencia de COS de 0-20 cm de profundidad

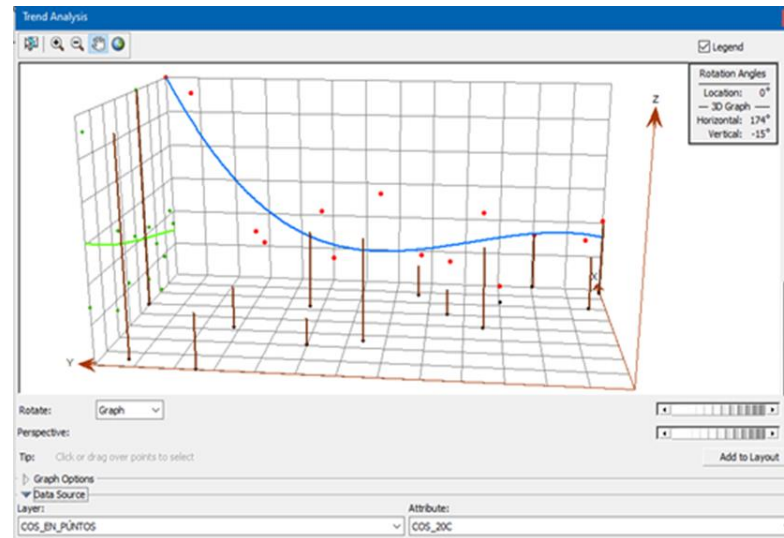


Figura 13

Semivariograma de variabilidad de COS de 0-20 cm de profundidad

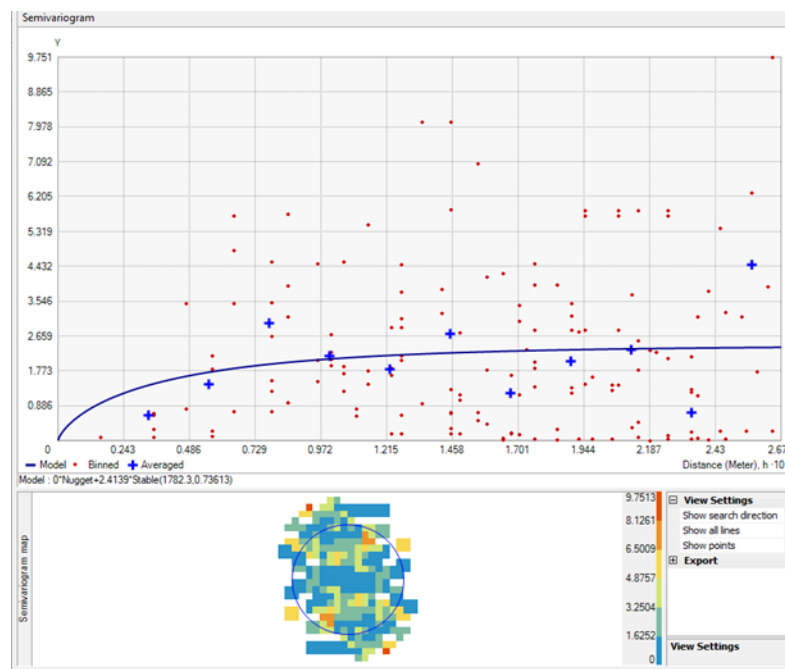
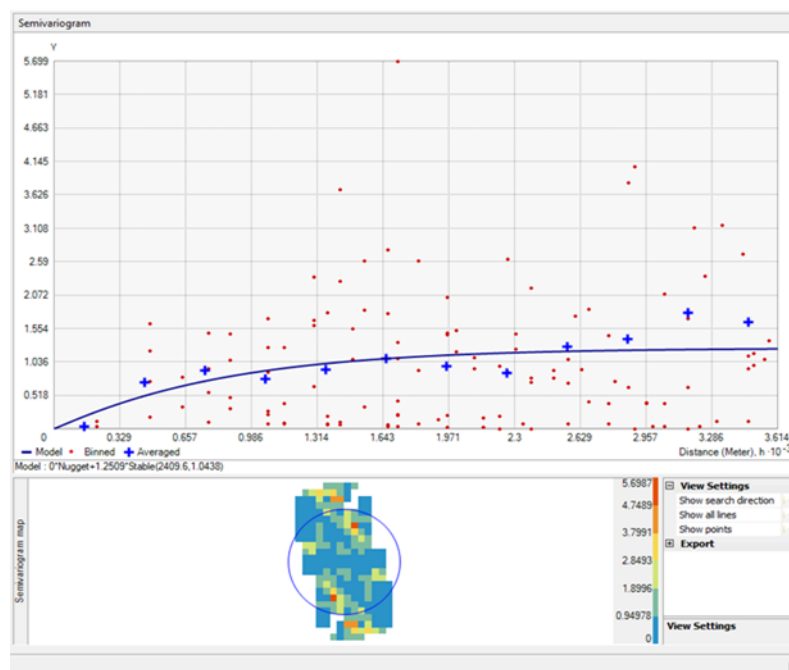


Figura 14

Semivariograma de variabilidad de COS de 20-45 cm de profundidad



B. Variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo (COS)

Las Figuras 15, 16 y 17 representan la interpolación del COS en la microcuenca a profundidades de 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm, mostrando valores altos (6.81 kg/m^2) en la parte montañosa y capa superficial, y el valor más bajo (0.17 kg/m^2) en la capa más profunda de la zona baja aluvial.

La Figura 15 muestra la distribución del carbono orgánico del suelo (COS) en la capa de 0-20 cm. La zona montañosa presenta los valores más altos ($4.88\text{-}6.81 \text{ kg/m}^2$) en el 24% del área, la zona intermedia tiene valores entre 3.88 y 4.88 kg/m^2 en el 49% del área, y la zona baja muestra los valores más bajos ($1.93\text{-}3.88 \text{ kg/m}^2$) en el 27% del área.

La variabilidad espacial del COS de 20-45 cm de profundidad (Figura 16) muestra reservas de carbono que oscilan entre 4.17 y 0.79 kg/m^2 , proporcionando una visualización de su distribución en la microcuenca. La zona montañosa de la microcuenca presenta las mayores reservas de COS ($2.71\text{-}4.17 \text{ kg/m}^2$), cubriendo el 24% del área. La zona intermedia tiene valores de COS entre 1.97 y 2.71 kg/m^2 , ocupando el 49% del área, mientras que en la zona baja el contenido de COS disminuye a $0.79\text{-}1.97 \text{ kg/m}^2$, abarcando el 27% del área total.



A la profundidad de 45-105 cm (Figura 17), los resultados de reservas de COS varían con profundidad de 0,17 a 4,59 kg/m², presentan la misma tendencia descrita para 20-45 cm de profundidad. A esta profundidad la zona montañosa de la microcuenca presenta valores altos de COS llegando hasta 4,59 kg/m², seguida de la zona intermedia y con una disminución visible en parte baja llegando hasta 0,17 kg/m² en el contenido de carbono orgánico.

Figura 15

Variabilidad espacial de COS de 0 – 20 cm de profundidad del suelo

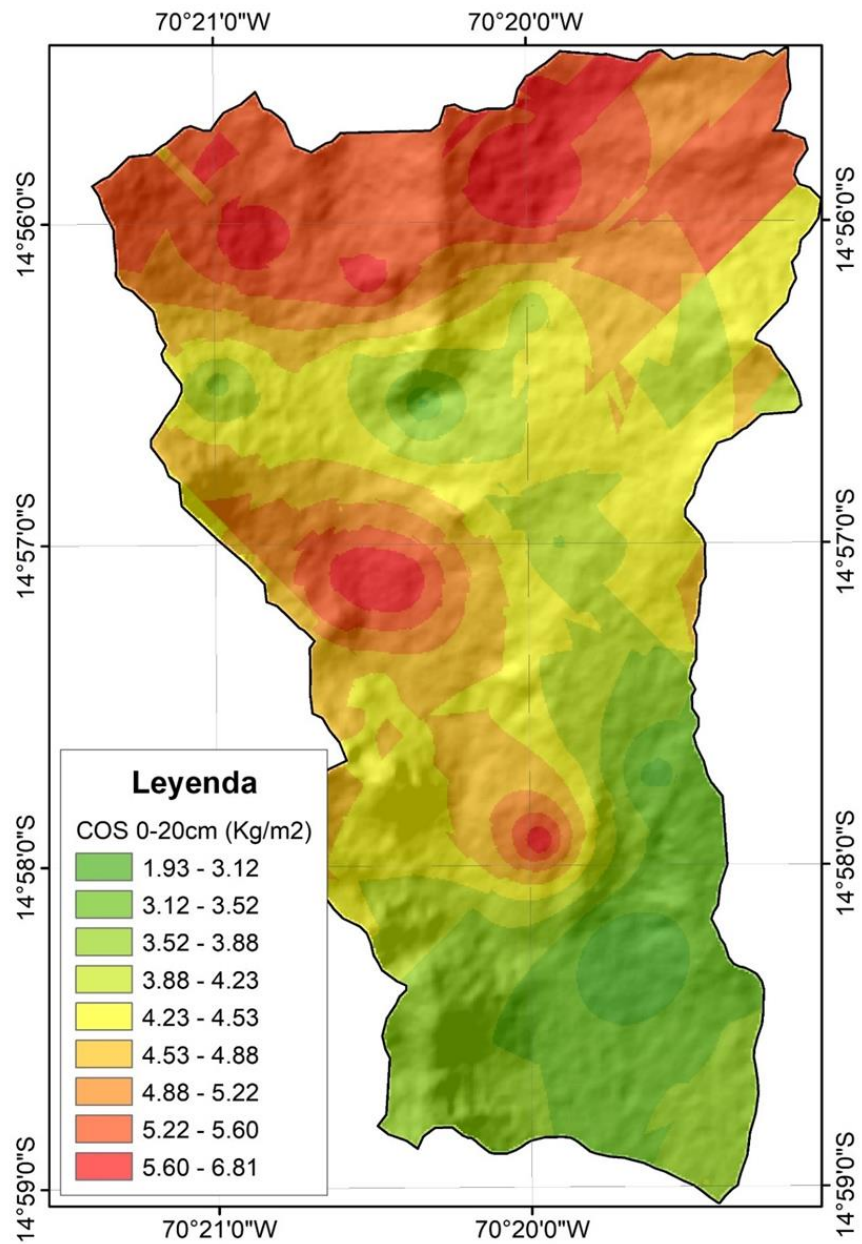


Figura 16

Variabilidad espacial de COS de 20 - 45 cm de profundidad del suelo

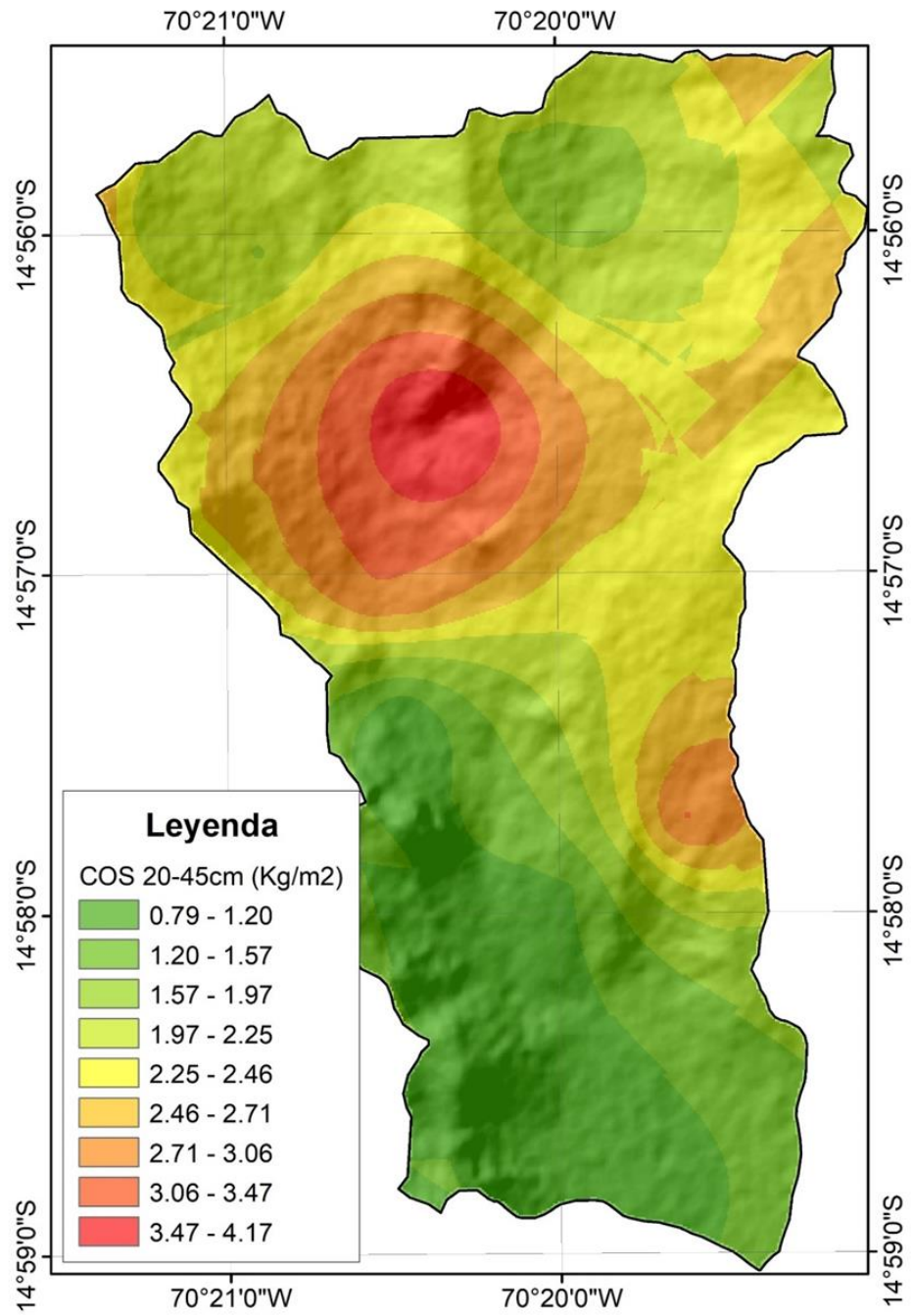
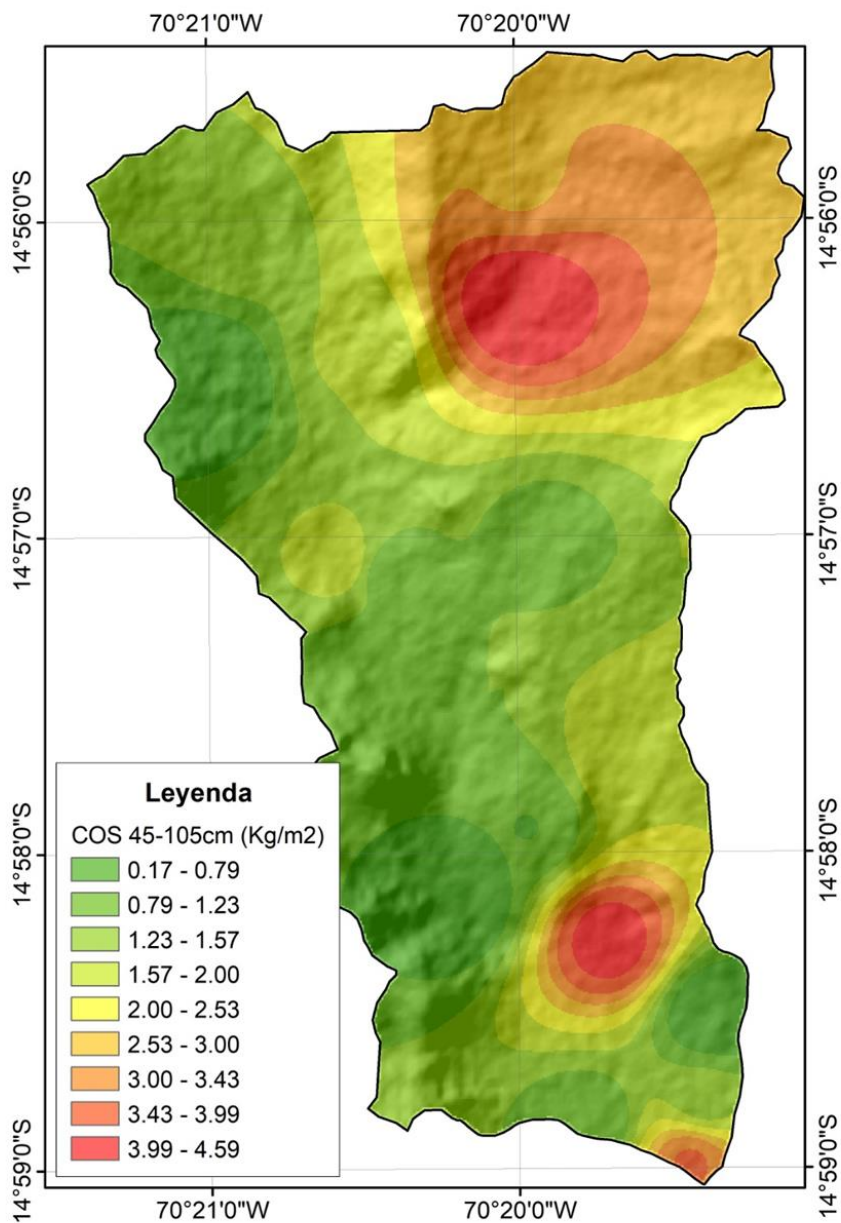


Figura 17

Variabilidad espacial de COS de 45-105 cm de profundidad del suelo



4.1.3 Modelamiento espacial por superposición ponderada entre el COS, uso actual de la tierra y variables ambientales

A. Uso actual de la tierra y distribución espacial del carbono orgánico del suelo

En la microcuenca Pacramayo, se han identificado cuatro categorías de uso del suelo: 5 Gran grupos de uso, 8 Grupos de uso, 12 Subgrupos de uso y 20 Tipos de uso (Tabla 4).

A.1 Gran Grupo Rasgos Culturales (C)

Son áreas ocupadas por centros rurales y estructurales, destinadas a actividades comunales, educativas y culturales. Ocupan 0.39% del área de la microcuenca Pacramayo.

A.2 Gran Grupo Tierras Agrícolas (A)

Estas áreas están destinadas a la actividad agrícola, incluyendo tierras que se dejan en barbecho de manera periódica o que se usan temporalmente como pastizales. Representan el 3.41% de la superficie total. Las especies identificadas en estas zonas son *Medicago sativa*, *Avena sativa* y *Solanum tuberosum*.

A.3 Gran Grupo Tierras de Pastizales (P)

Cubre el 60.72% de la microcuenca, con pajonales y pastizales altoandinos. Compuestos por especies herbáceas no lignificadas y lignificadas levemente, que les da una consistencia blanda en todos sus órganos, tanto subterráneos como epigeos (Font Quer, 2001). Se dividen en pastizal tipo pajonal (dominado por *Stipa ichu*, crespillo y *chiji*) y pastizal tipo césped (*Mühlenbergia ligularis* y *Mühlenbergia peruviana*) en diversas densidades. Estas formaciones vegetales no han sido alteradas significativamente.

A.4 Gran Grupo Cuerpos de Agua (W)

Los "bofedales", áreas con vegetación inundada y suelos hidromórficos, cubren el 0.26% del área total. Son fundamentales para el manejo tradicional del agua y del ganado, además de ser una fuente de forraje y biodiversidad en la región altoandina.

A.5 Gran Grupo Tierras Eriales (E)

Esta zona, que ocupa el 35.22% de la microcuenca, se divide en suelo desnudo (17.64%), con terrenos sin cultivar y erosionados, y roca fragmentada expuesta (17.58%), con afloramientos rocosos en proceso de meteorización.

Tabla 4

Uso actual de la tierra

Gran grupo	Grupo	Subgrupo	Tipo de uso	Símbolo	Área	Área
Rasgos culturales (C)	Centro rural (Cc)	Centro poblado	Centro poblado	Ccpp	0.58	0.03
		Centro poblado	Vivienda rural	CcVr	2.84	0.16
	Centro estructural	Escuela	Escuela	CEe	0.26	0.02
		Carretera	Trocha	CEt	3.14	0.18
Tierras agrícolas (A)	Cultivos y pradera (AC)	Cultivos en secano (s)	Papa dulce	ACsPd	5.5	0.32
			Avena forrajera	ACsAf	31.07	1.79
		Pajonal ralo (pr)	Alfalfa	ACsA	22.6	1.3
			Pajonal ralo de ichu	PAprI	5.46	0.32
			Pajonal ralo de tisna ichu	PAprTi	11.32	0.65
	Pastizales altoandinos tipo pajonal (PA)	Pajonal semidenso (psd)	Pajonal semidenso de ichu	PAPsdI	89.61	5.17
			Pajonal semidenso de tisna ichu	PAPsdTi	29.01	1.68
		Pajonal denso (pd)	Pajonal semidenso de crespillo	PAPsdC	58.27	3.37
			Pajonal semidenso de chilligua	PAPsdCh	4.46	0.26
			Pajonal denso de ichu	PAPdI	670.09	38.7
Tierras de pastizales (P)	Pastizales altoandinos tipo césped (PH)	Pajonal denso de crespillo	PAPdC	68.81	3.97	
		Pastizal denso	PHdCj	96.23	5.56	
	Humedal (H)	Pastizal semidenso de chiji	PHsdCj	18.08	1.04	
		Humedal	Humedal	WH	4.58	0.26
Cuerpo de agua (W)	Suelo desnudo (S)	Suelo desnudo (Sd)	Suelo desnudo	Sd	305.39	17.64
		Roca expuesta (R)	Roca expuesta fragmentada	ERf	304.36	17.58
Total					1731.6	100

Para entender la variabilidad del carbono orgánico del suelo (COS), se han integrado usos del suelo con variables ambientales en modelos dinámicos, usando estimaciones de COS a 20 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario. El contenido de carbono orgánico del suelo se clasifica en 9 rangos (Tabla 5), que varían entre 1.93 y 6.81 kg/m², y sus reservas están estrechamente ligadas a los usos del suelo, mejorando la eficiencia y precisión en la estimación de COS.

El incremento de la tasa y áreas de COS de sur a norte en la microcuenca, influenciado por variables ambientales como altitud, pendiente, precipitación, densidad aparente y temperatura. Para una interpretación adecuada, los tipos de uso de la tierra y el contenido de COS se han reagrupado en tres rangos: 1.93 a 3.88 Kg/m², 3.88 a 4.88 Kg/m² y 4.88 a 6.81 Kg/m².

La zona aluvial en el sur de la microcuenca cubre el 54.39% del área total y es intensamente utilizada para cultivos y pastizales, presenta la tasa más baja de COS, entre 1.93 y 3.88 Kg/m². Los suelos son medianamente profundos a profundos, con densidad aparente de 1.32 a 1.54 g/cm³, muestran compactación y menor contenido de COS debido al uso intensivo. Las altitudes varían entre 3942 y 4186 metros, la precipitación anual es la más baja de la microcuenca (689.55 a 726.25 mm), y la temperatura media ha aumentado a entre 7.36 y 8.17 °C.

La zona intermedia de la microcuenca, con una tasa de COS de 3.88 a 4.88 kg/m², abarca el 16.22% del área total, con suelos superficiales a medianamente profundos y menos uso intensivo debido al clima frío y menor actividad humana, situada a altitudes de 4255-4400 m, tiene mayor precipitación (726.25-760.85 mm) y menor temperatura (6.58-7.36 °C). La intervención humana es mínima, con suelos dedicados principalmente a pastizales y pequeñas áreas de bofedales, mientras que las tierras eriales disminuyen.

La zona montañosa abarca el 29.31% del área total, con una tasa de COS de 4.88 a 6.81 kg/m², los suelos son superficiales con clima frío y altitudes que van de 4400-4695 m, tiene la mayor precipitación anual de

la microcuenca (760.85-823.91 mm) y la temperatura media más baja (5.63-6.58 °C). La intervención humana es mínima, el suelo es dedicado principalmente a pastizales como pajonal denso de ichu, pastizal denso de chiji y pajonal ralo de tizna ichu, las tierras eriales disminuyen significativamente. Las áreas con poca intervención humana mantienen la composición y estructura del ecosistema, aumentando la provisión de servicios ecosistémicos.

Figura 18

Mapa de uso actual de la tierra

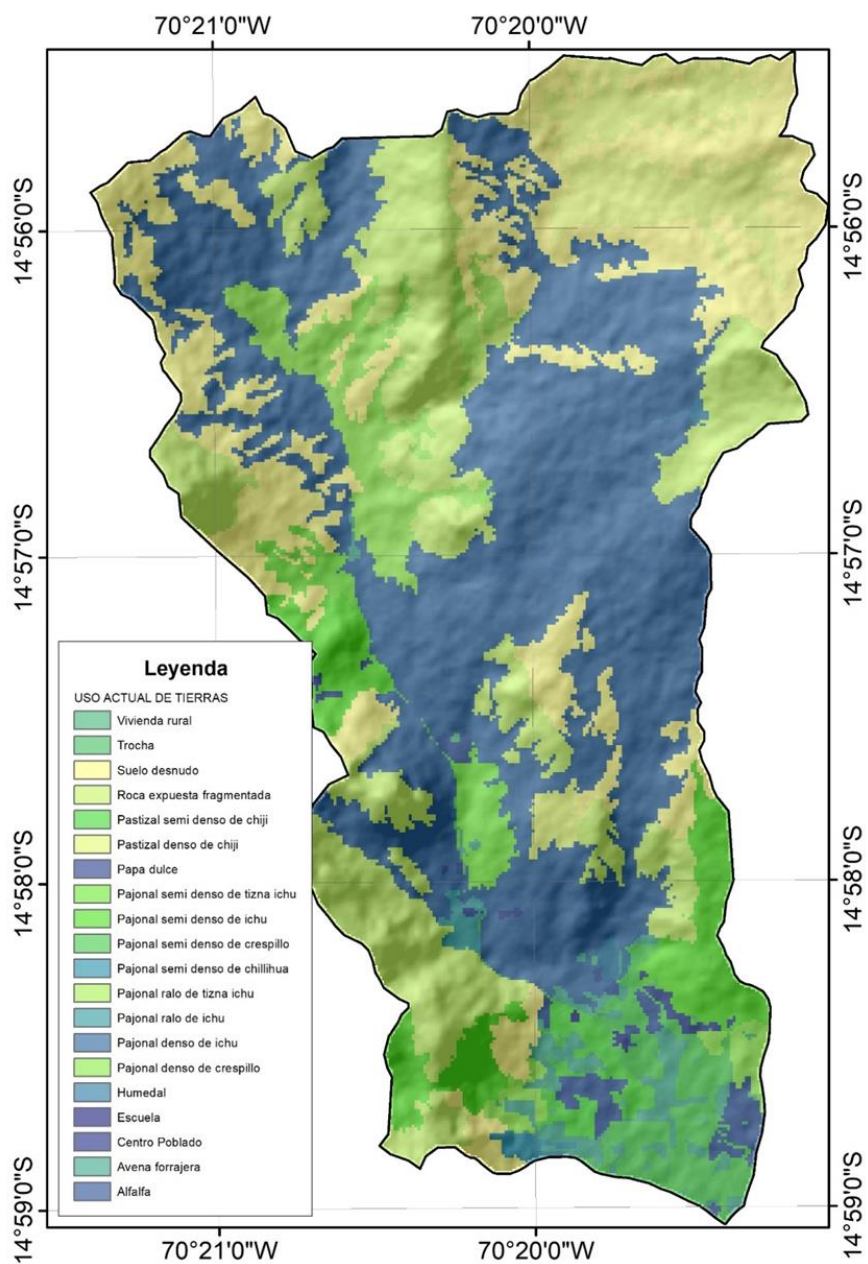
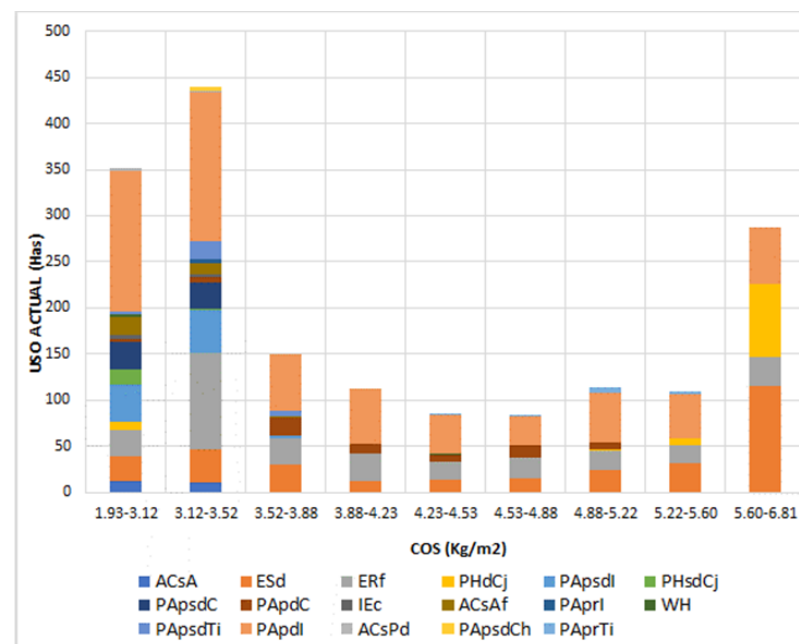


Tabla 5
Variabilidad espacial de COS y uso actual de la tierra

	Contenido de COS kg/m ²											Total	%
	1.93-3.12	3.12-3.52	3.52-3.88	3.88-4.23	4.23-4.53	4.53-4.88	4.88-5.22	5.22-5.60	5.60-6.81				
USO DE LA TIERRA													
ACsA	11.42	11.17										22.60	1.30
ESd	27.38	35.75	29.45	12.33	13.41	15.69	23.67	32.06	115.65			305.39	17.64
ERf	28.02	104.87	29.56	29.57	19.50	21.25	21.51	19.55	30.52			304.36	17.58
PHdCj	8.85						0.88	6.58	79.92			96.23	5.56
PAPsdI	40.72	46.34	2.56									89.61	5.17
PHsdCj	16.91	1.16										18.08	1.04
PAPsdC	29.53	28.75										58.27	3.37
PAPdC	3.80	5.47	19.54	10.07	7.70	14.13	8.09	0.00				68.81	3.97
IEc	3.57	3.24										6.81	0.39
ACsAf	19.63	10.98	0.46									31.07	1.79
PAPrI	0.21	5.25										5.46	0.32
WH	2.96				1.61							4.58	0.26
PAPsdTi	3.30	19.65	6.06									29.01	1.68
PAPdI	151.93	160.63	62.68	60.13	41.75	30.71	53.25	48.46	60.54			670.09	38.70
ACsPd	3.76	1.73										5.50	0.32
PAPsdCh		4.46										4.46	0.26
PAPrTi	351.99	439.46	150.31	112.10	84.53	84.33	113.75	108.53	286.63			1731.63	100.00
Total	20.33	25.38	8.68	6.47	4.88	4.87	6.57	6.27	16.55			100.00	
%													

Figura 19

Variabilidad espacial de COS y uso actual de la tierra



B. Superposición ponderada para el modelamiento espacial de COS

La "superposición ponderada" combina datos asignando pesos a cada variable basada en su importancia para predecir el COS. Para esto, se emplean modelos estadísticos o algorítmicos, como la regresión espacial o técnicas de aprendizaje automático. El producto final es un mapa que muestra la distribución estimada del COS en el suelo en función de la combinación de datos de uso de la tierra, variables ambientales y climatológicas. Esto es valioso para comprender las áreas que tienen altos o bajos niveles de COS y pueden ayudar en la toma de decisiones en la agricultura, gestión de tierras, conservación y otros campos. Ofrece información crucial sobre la salud del suelo y su capacidad de almacenamiento de carbono orgánico.

Para aplicar los criterios de ponderación, se ha utilizado los resultados de correlación lineal entre el carbono orgánico del suelo (COS) y variables ambientales y climatológicas, tales como el uso actual de suelo, pendiente, precipitación y temperatura. En las Tablas 6 y 7, se presentan

los valores de ponderación asignados a cada variable en una escala del 1 al 9, mientras en la Tabla 8 muestra los pesos en porcentaje correspondientes a la contribución y el incremento del COS. Se asignan ponderaciones a los factores más relevantes, mientras que los factores menos relevantes reciben ponderaciones más bajas.

Los resultados se procesaron con la herramienta de superposición ponderada ("weighted overlay") en ArcMap, permitiendo analizar la variabilidad espacial del COS a tres profundidades: 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm. La Figura 20 muestra el esquema del modelado utilizando esta técnica, y la Figura 21 ejemplifica el procesamiento a una profundidad de 0-20 cm.

En la parte baja de la cuenca con intensa actividad agrícola, los valores de COS son inferiores a 3 kg/m². En la zona intermedia con mínima actividad agrícola, los valores varían entre 3 kg/m² y 5 kg/m². En las zonas más altas sin actividad agrícola, las reservas de COS son mayores, oscilando entre 5 kg/m² y 6.8 kg/m². Los valores medios representan más del 50% del área total de estudio.

Tabla 6

Ponderación de variables ambientales en el modelamiento espacial de COS a diferentes profundidades del suelo

Variación de COS con profundidad del suelo (Kg/m ²)			Variables ambientales				Peso
0-20 cm	20-45 cm	45-105 cm	Uso tierra	Pend. %	Precipitación mm	Temperat. °C	
1.93-3.12	0.79-1.20	0.87-1.19	RE	>75	689.55-701.32	7.95-8.17	1
3.12-3.52	1.20-1.57	1.19-1.37	VRT	50-75	701.32-714.02	7.64-7.95	2
3.52-3.88	1.57-1.97	1.37-1.50	Sd	25-50	714.02-726.25	7.36-7.64	3
3.88-4.23	1.97-2.25	1.50-1.61	Papa	15-25	726.25-737.88	7.13-7.36	4
4.23-4.53	2.25-2.46	1.61-1.72	Avena	8-15	737.88-748.72	6.86-7.13	5
4.53-4.88	2.46-2.71	1.72-1.85	Alfalfa	4-8	748.72-760.85	6.58-6.86	6
4.88-5.22	2.71-3.06	1.85-2.04	Humedal	2-4	760.85-773.84	6.31-6.58	7
5.22-5.60	3.06-3.47	2.04-2.34	Pajonal	0-2	773.84-788.48	6.01-6.31	8
5.60-6.81	3.47-4.17	2.34-2.65	pdCj	0	788.48-823.91	5.63-6.01	9

RE=Roca expuesta, VRT=Vivienda rural y trocha, Sd=Suelo desnudo, pdCj=Pastizal denso de chiji

Tabla 7

Ponderación de variables ambientales para el modelamiento de COS

Variable	Unid.	Peso (%)	Rangos	Valor (%)	Ponderación
Uso de Suelo	-	20%	Roca expuesta	2.22	1
			Vivienda rural y trocha	4.44	2
			Suelo desnudo y trocha	6.67	3
			Papa	8.89	4
			Avena forrajera	11.11	5
			Alfalfa	13.33	6
			Humedal	15.56	7
			Pajonal	17.78	8
			Pastizal denso de chiji	20.00	9
			Pendiente	%	10%
50-75	2.50	2			
25-50	3.75	3			
15-25	5.00	4			
8-15	6.25	5			
4 -8	7.50	6			
2-4	8.75	7			
0-2	10.00	8			
Precipitación	mm	10%	689.55 - 701.32	1.11	1
			701.32 - 714.02	2.22	2
			714.02 - 726.25	3.33	3
			726.25 - 737.88	4.44	4
			737.88 - 748.72	5.56	5
			748.72 - 760.85	6.67	6
			760.85 - 773.84	7.78	7
			773.84 - 788.42	8.89	8
			788.42 - 823.91	10.00	9
Temperatura	°C	10%	5.63 - 6.01	1.11	9
			6.01 - 6.31	2.22	8
			6.31 - 6.58	3.33	7
			6.58 - 6.86	4.44	6
			6.86 - 7.13	5.56	5
			7.13 - 7.36	6.67	4
			7.36 - 7.64	7.78	3
			7.64 - 7.95	8.89	2
7.95 - 8.17	10.00	1			

Figura 20

Esquema de modelamiento por superposición ponderada del COS y variables ambientales

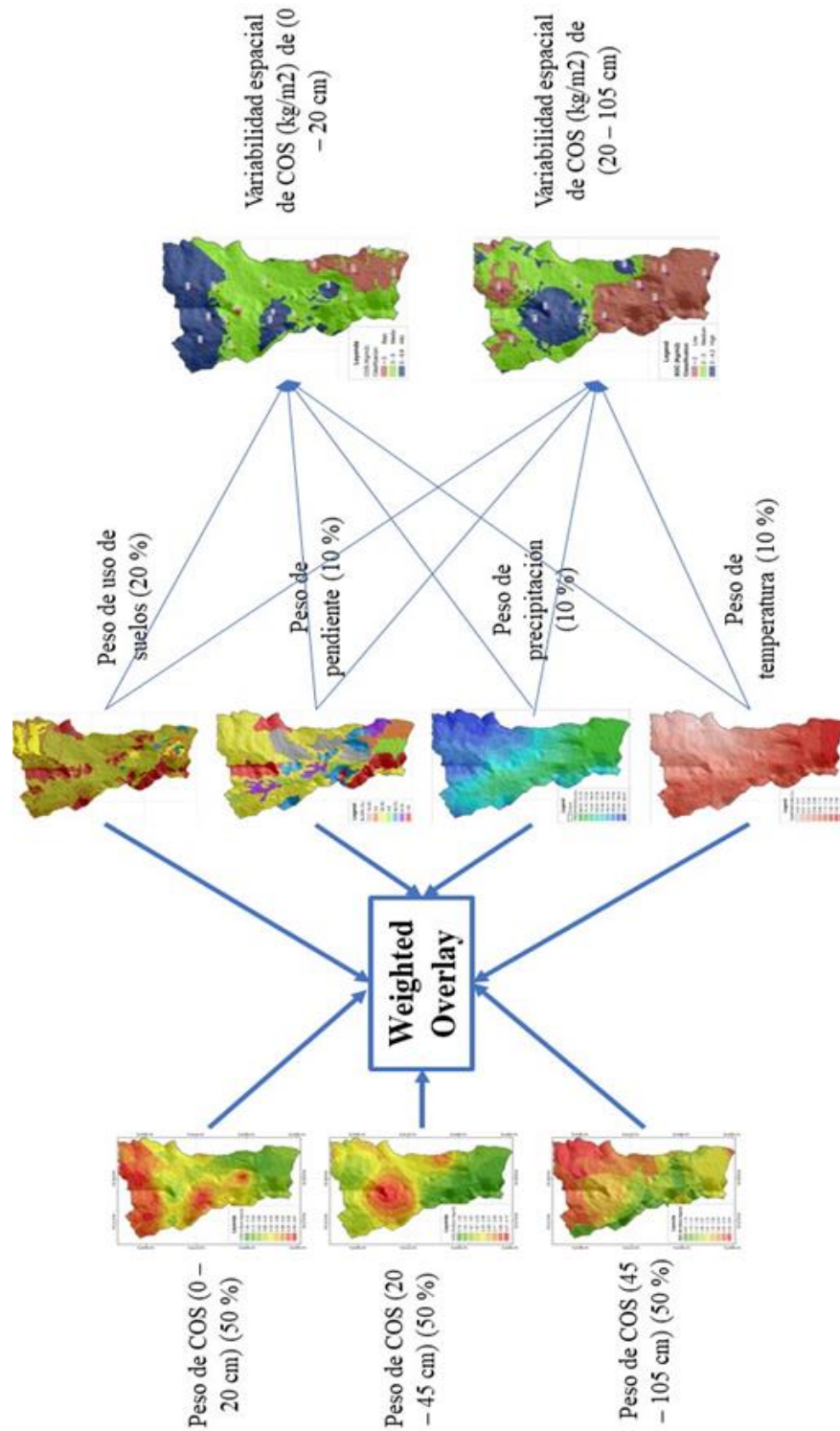


Figura 21

ArcMap y modelamiento espacial del COS, de 0 – 20 cm de profundidad

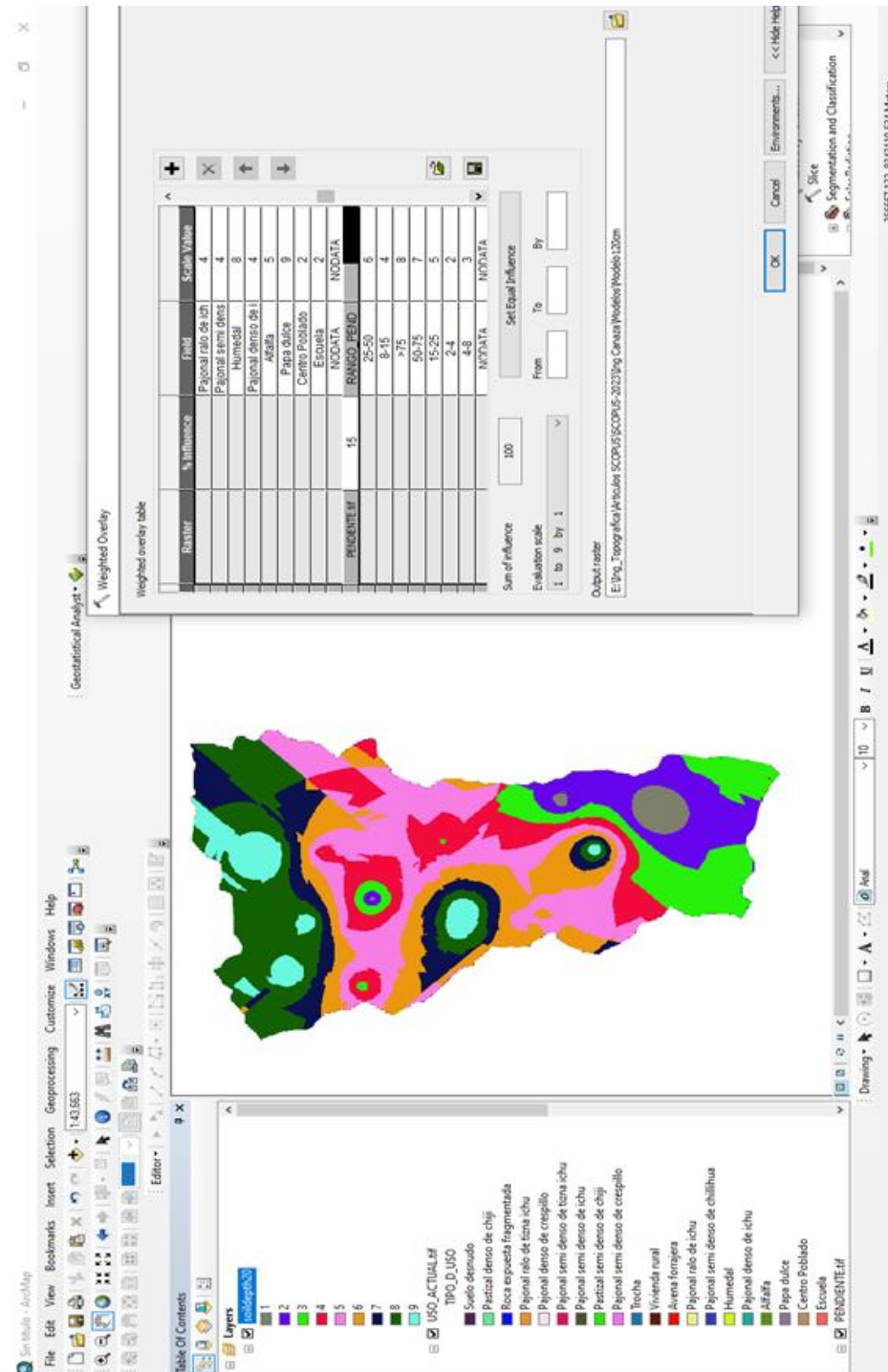


Tabla 8

Ponderación de variables ambientales en el modelamiento de COS en la capa superior del suelo

Variable	COS (r)	Ponderación (1 al 9)	Superposición ponderada (%)
COS	--	1 a 9	50
Precipitación	0.388	1 a 9	10
Temperatura	-0.318	9 a 1	10
Uso del suelo	--	1 a 9	20
Elevación	0.402	1 a 9	--
M. O.	0.592	--	--
Pendiente	--	1 a 8	10
		Total	100

A la profundidad de 20-45 cm (Figura 23), las reservas de COS disminuyen en toda el área. Esta disminución se atribuye a la ausencia de cobertura vegetal directa y al limitado impacto de las variables utilizadas, considerando la profundidad de este horizonte. Los valores de COS en este perfil oscilan entre 2 kg/m² y 4,2 kg/m².

En cuanto a la profundidad de 45-105 cm (Figura 24), los valores de carbono orgánico del suelo (COS) en toda el área oscilan entre 0,87 kg/m² y 2,65 kg/m². Estos resultados indican que las capas más profundas del suelo exhiben una menor cantidad de reservas de carbono.

Figura 22

Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, de 0-20 cm de profundidad.

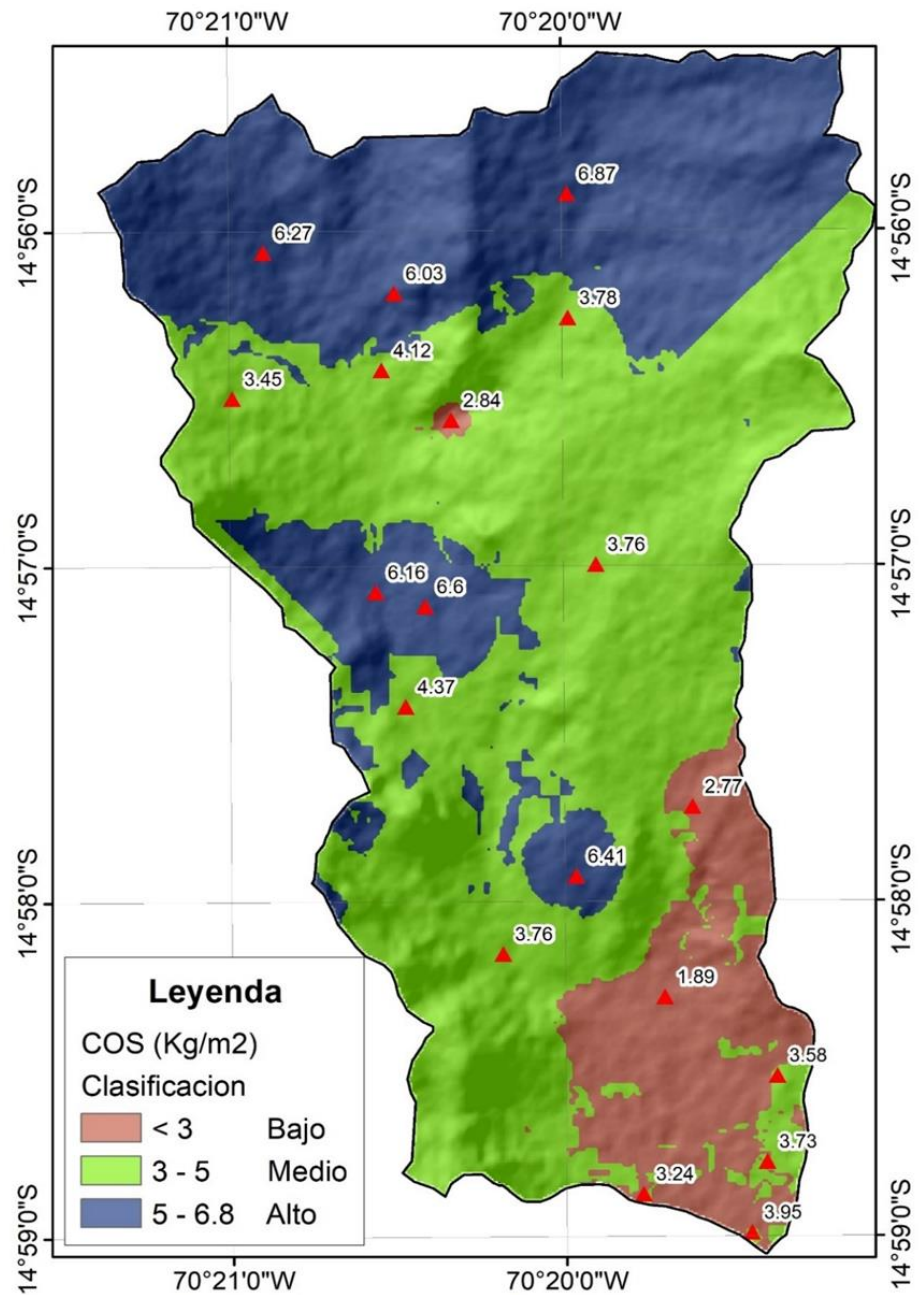


Figura 23

Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, 20-45 cm de profundidad

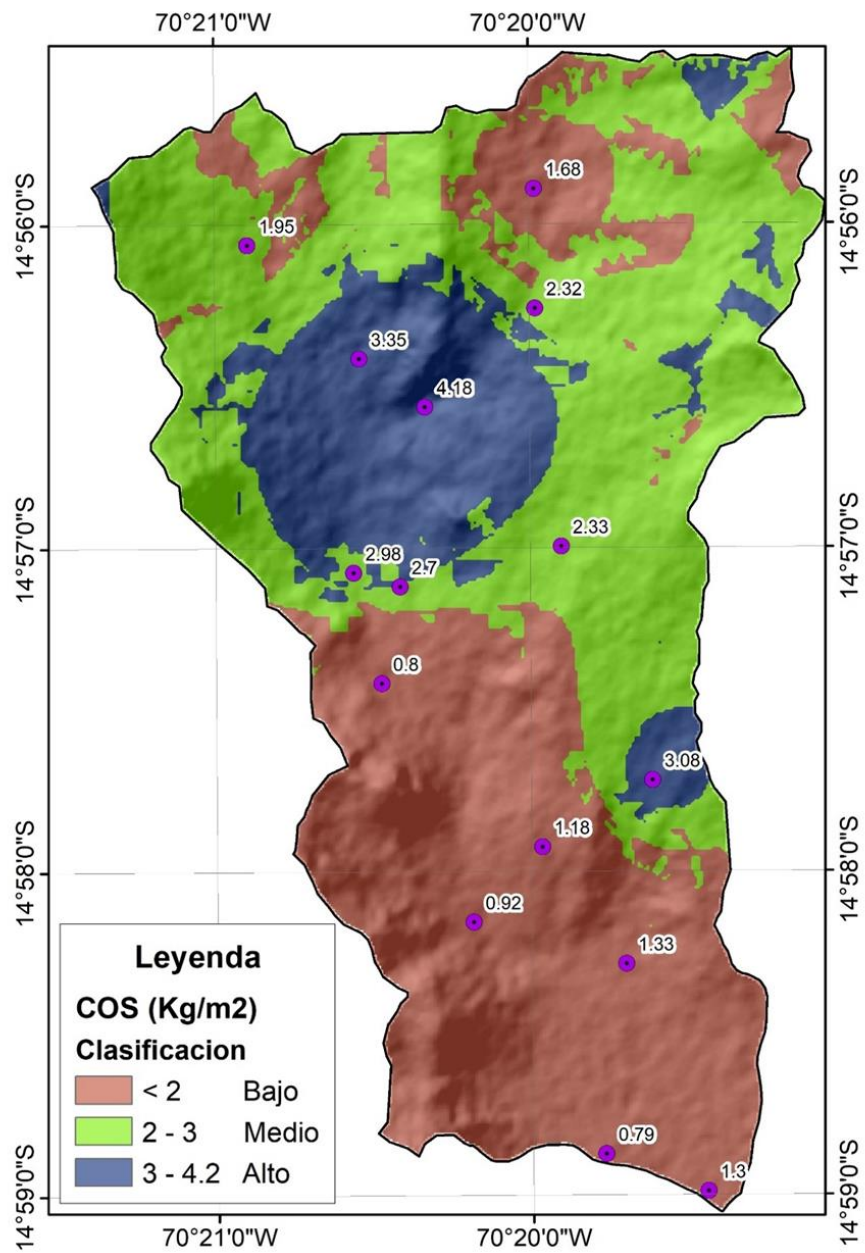
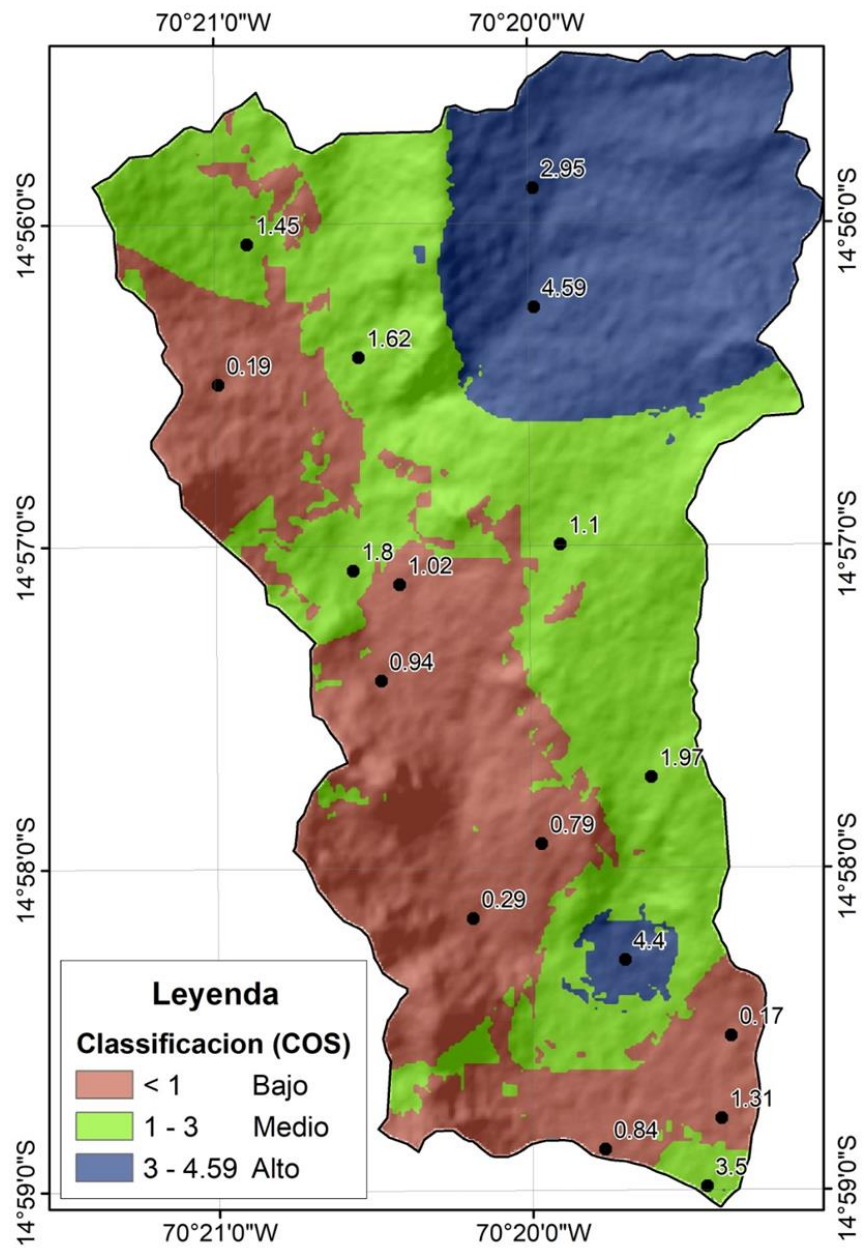


Figura 24

Modelamiento espacial de carbono orgánico del suelo, 45-105 cm de profundidad



4.2 **Discusión**

4.2.1 **Variables ambientales en la determinación de carbono orgánico del suelo (COS)**

A. Determinación del COS en los puntos de muestreo

En la Tabla 2 del capítulo de resultados el contenido de carbono orgánico del suelo varía de 1.89 Kg/m² a menor altitud de la microcuenca hasta 6.87 Kg/m² a mayores altitudes.

El contenido de carbono orgánico presente en el suelo se encuentra en parte influenciado por diversos factores, tales como las condiciones físicas y ambientales a las que está expuesto, la pendiente del terreno, la altitud, el clima y otras características de su composición (Choudhary et al., 2016; Jakšić et al., 2021).

La influencia del clima y la altitud mostró una tendencia similar en las investigaciones realizadas por Griffiths (2009) en la zona montañosa de Oregón, Estados Unidos, y por Balima et al (2021) en Correlación de carbono orgánico del suelo (COS) con variables ambientales la región sudanesa de África occidental.

B. Correlación de carbono orgánico del suelo (COS) con variables

El aumento del contenido de carbono orgánico del suelo con el incremento de la precipitación refleja una tendencia de mayor acumulación de COS, impulsada por el desarrollo de la vegetación y otros factores físicos asociados. En terrenos llanos y ondulados, con pendientes moderadas, la vegetación predominante consiste en gramíneas perennes, debido a las abundantes precipitaciones y aumento de humedad, que redujo la proporción de suelo desnudo y mayor cobertura vegetal (Florez, 2005).

La relación entre la temperatura y el contenido de carbono orgánico del suelo existe una relación lineal inversa de baja magnitud hasta 45 cm de profundidad (Tabla 3 y Figura 6b y 7b), para horizontes inferiores la tendencia se invierte. Esto explica que a medida que

disminuye la temperatura del suelo, hay mayor acumulación de carbono orgánico del suelo, facilitando la formación de la capa superficial de los pastizales (Hunt et al., 2020).

Sin embargo, esta tendencia desaparece en las capas más profundas. La actividad humana ha alterado la dinámica de la materia orgánica, generando una disminución general del contenido que existía bajo la vegetación natural (Andriulo et al., 2001). No obstante, la actividad humana en el entorno ha manifestado diversas peculiaridades.

Un estudio anterior evaluó mayores reservas de carbono en ecosistemas de matorral a mayores altitudes y menores reservas de carbono a altitudes más bajas, con una correlación de $r = 0,75$, lo que sugiere una fuerte relación entre la altitud y las reservas de carbono en ecosistemas de matorral (Solano et al., 2018). El hallazgo de que las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) son mayores en los bosques y menores en los pastizales, y que esta tendencia aumenta con el incremento de altitud, concuerda con múltiples factores que afectan los patrones de almacenamiento de carbono orgánico (Manojlović et al., 2011).

La capacidad de almacenamiento de COS de los pastizales naturales altoandinos está controlada por el gradiente altitudinal y la temperatura del suelo, con mayores altitudes asociadas con una mayor capacidad de almacenamiento de COS, es consistente con otros factores (Huaman et al., 2021). Es importante señalar a profundidades mayores de 45 cm, la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y la altitud no presenta la misma tendencia positiva que se observa en las capas superficiales del suelo (Tabla 3 y Figura 8d)

En resumen, la capacidad de retención de carbono orgánico del suelo (COS) en los pastizales naturales de alta montaña está influenciada por el gradiente altitudinal y la temperatura del suelo, y a altitudes más elevadas están asociadas con una mayor capacidad de almacenamiento de COS, coincide con otros factores.

4.2.2 Variabilidad espacial de reservas de carbono orgánico del suelo (COS) por Kriging Ordinario (KO)

Las reservas de carbono orgánico, inorgánico y total en los ecosistemas terrestres están influenciadas por una serie de factores, incluyendo la exposición a las condiciones ambientales, la cobertura vegetal y el uso de la tierra (Yescas-Coronado et al., 2018).

En climas fríos y húmedos, el carbono tiende a acumularse en los suelos debido a una descomposición más lenta, mientras que en climas cálidos y húmedos la descomposición es más rápida, habrá una menor acumulación de carbono. La vegetación actúa como una fuente de carbono orgánico a medida que las plantas realizan la fotosíntesis y almacenan carbono en su biomasa, y también como una fuente de carbono inorgánico cuando las hojas y otros materiales vegetales se descomponen y liberan carbono en el suelo.

A. Análisis de semivariograma de COS

El análisis geoestadístico ayuda a comprender la distribución de los almacenes de carbono en el suelo y su variabilidad espacial, fundamental para la gestión de ecosistemas, la mitigación del cambio climático y la toma de decisiones informadas en agricultura, silvicultura y conservación.

El análisis del semivariograma es una herramienta esencial en la geoestadística y la cartografía geoespacial, permitió analizar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo, a medida que la distancia entre los puntos de muestreo aumenta y para deducir las estimaciones de las variables aleatorias en puntos no muestreados (Martinez y Ramírez, 2005), según esto podemos observar que tan parecidos son los puntos en el espacio a medida que se encuentran más alejados.

El análisis geoestadístico mediante el uso del semivariograma nos permitió entender la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a profundidades de 0-20 cm y 20-45 cm. También proporcionó información sobre la estructura de dependencia espacial, ayudando a identificar patrones y tendencias en la distribución de estas propiedades en el paisaje.

Esto tiene importantes implicaciones para el manejo agrícola y la toma de decisiones en relación con el abonado del suelo y otros procesos agrícolas.

B. Variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo (COS)

Los resultados indican que la altitud y variables climáticas, como la precipitación y la temperatura, son fundamentales para el almacenamiento de COS, y que la distribución de las reservas de COS varía según las zonas altitudinales de la microcuenca.

Podemos deducir que el patrón consistente de disminución de las reservas de COS con el aumento de la profundidad del suelo se alinea con la comprensión general de la dinámica del COS. Estos resultados podrían proporcionar información valiosa para la gestión de la tierra y las estrategias de conservación del suelo. Destaca la necesidad de centrarse en preservar y mejorar las reservas de COS en las capas superficiales, donde son más abundantes, y adoptar prácticas que minimicen el agotamiento de COS en las zonas más profundas del suelo.

4.2.3 Modelamiento espacial por superposición ponderada entre el COS, uso actual de la tierra y variables ambientales

A. Uso actual de la tierra y distribución espacial del carbono orgánico del suelo

El uso de la tierra es crucial para mitigar el cambio climático, actuando como principal sumidero de carbono (FAO, 2002), aunque los cambios en su uso generan emisiones netas de GEI (IPCC, 2000). La relación entre el uso de la tierra y la dinámica del COS es vital para recomendar prácticas de gestión y predecir futuros escenarios de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático.

La integración entre el carbono orgánico del suelo (COS) y el uso actual de la tierra (UAT), que se muestra en la Tabla 5 y Figura 19, revela que cambios en la cobertura vegetal en tierras altas aumentan la vulnerabilidad del suelo a la degradación. El uso y la gestión de la tierra

son factores críticos en la determinación del stock de COS (Lis-Gutiérrez et al., 2019).

Los resultados, alineados con otras investigaciones, indican que la producción primaria neta, la composición forestal y el clima son factores limitantes en el secuestro de carbono, mientras que la erosión, la deforestación y el uso de la tierra pueden disminuir la acumulación de carbono en el suelo (USDA, 2019).

Estudios sobre ecosistemas de tierras altas en los Andes colombianos indican que los cambios en la cubierta vegetal aumentan la vulnerabilidad del suelo a la degradación y emisiones de dióxido de carbono por mayor actividad humana (Lis-Gutiérrez et al., 2019). El uso y la gestión de la tierra son factores clave para la reserva de COS. Los resultados coinciden con Fisher (2000), quien señala que la producción primaria neta, la composición del bosque y el clima limitan la retención de carbono, mientras que la erosión, la deforestación y el uso del suelo reducen la acumulación de carbono en el suelo.

En las zonas montañosas con menos tipos de uso de la tierra y menor intervención humana, se produce una mayor acumulación de COS, favorecida por la vegetación densa promovidas por el pajonal denso de ichu y pastizal denso de chiji, mayor altitud, mayor precipitación, baja densidad del suelo y bajas temperaturas. Los suelos desnudos también son importantes en el contenido de COS, ya que las bajas temperaturas conservan la materia orgánica de raíces de vegetación pasada, por lo que su evaluación es necesaria.

B. Superposición ponderada para el modelamiento espacial COS

La técnica de superposición ponderada se utiliza para modelar espacialmente el Carbono Orgánico del Suelo (COS), integrando información sobre el uso actual del suelo, variables ambientales y climáticas. Este enfoque permite prever y cartografiar la distribución espacial del COS en una región determinada (Córdoba et al., 2014).

La investigación buscó determinar la variabilidad espacial del COS en el ecosistema altoandino de Puno, Perú, mediante modelado espacial y análisis de superposición ponderada, utilizando mapas temáticos de COS, uso actual de la tierra, precipitación, temperatura y pendiente.

El objetivo principal era entender la distribución espacial del COS en tres profundidades del suelo: 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm. La Figura 22 presenta los resultados del modelado de superposición ponderada para el perfil de 0-20 cm, mostrando resultados coherentes con las ponderaciones asignadas a las variables.

El estudio valida el enfoque de modelado y las ponderaciones empleadas al mostrar una buena correlación entre los resultados y los contenidos de COS. Estos hallazgos destacan el papel del uso del suelo, los factores climáticos y la materia orgánica en la distribución del COS en la región andina de Puno. Subraya la importancia de prácticas de gestión sostenible para mejorar las reservas de COS, lo que beneficia la productividad agrícola, el secuestro de carbono y la sostenibilidad de los ecosistemas altoandinos.

CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las principales conclusiones a los que se ha llegado a lo largo de este trabajo.

- En la estimación de las reservas de COS en la capa superior del suelo, se evaluaron altitud, precipitación, temperatura y materia orgánica, con coeficientes de correlación de Pearson de 0.402, 0.388, -0.318 y 0.592, respectivamente. Se encontró que a mayor altitud y precipitación, el contenido de COS aumenta, mientras que las bajas temperaturas favorecen su acumulación al retardar la descomposición de la materia orgánica.
- El Kriging Ordinario mostró que el COS varía entre 1.93 y 6.81 kg/m², siendo menor en la zona aluvial y mayor en la región montañosa. En la zona baja, con cultivos y pastizales, los suelos son profundos, con baja precipitación y altas temperaturas. En la zona intermedia, con suelos de profundidad media y menor actividad humana, se observa un clima frío, mayor precipitación y altitudes de hasta 4400 m. En la zona montañosa, donde la tasa de COS alcanza 6.81 kg/m², los suelos son superficiales, con baja actividad humana, clima frío, alta precipitación y altitudes de hasta 4695 m. Los suelos desnudos y las rocas fragmentadas en esta área almacenan COS de vegetación pasada.
- El modelamiento espacial permitió identificar áreas con diferentes niveles de carbono orgánico del suelo. En áreas con intensa actividad agropecuaria, se registraron niveles bajos de COS, menores a 3 kg/m², lo que sugiere posibles efectos negativos de las prácticas agrícolas, como la alteración del suelo, la disminución de la materia orgánica y los cambios en el uso del suelo. En contraste, las zonas sin actividad agrícola, pero con pastoreo y que mantenían ecosistemas naturales mostraron niveles medios de COS, entre 3 kg/m² y 5 kg/m². Por último, en áreas más altas de la microcuenca, sin actividad agrícola muestra niveles elevados de COS entre 5 kg/m² y 6.8 kg/m².
- El estudio ofrece una visión detallada de la distribución y dinámica del COS en los ecosistemas altoandinos, subrayando su importancia para fomentar la captura de carbono atmosférico y contribuir a la mitigación del cambio climático global.



RECOMENDACIONES

Basados en los resultados del estudio, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Fomentar la conciencia y educación sobre el papel del carbono orgánico del suelo en la agricultura sostenible, incluyendo la capacitación de agricultores en técnicas de manejo que mejoren la retención de carbono y conserven áreas naturales.
- Implementar prácticas agrícolas sostenibles para minimizar la pérdida de carbono orgánico del suelo, promoviendo la retención de materia orgánica y evitando la erosión.
- Promover la conservación y restauración de pastizales y bosques con altas reservas de COS a través de la reforestación y prácticas de manejo que minimicen la pérdida de carbono es esencial para una gestión sostenible.
- Realizar investigaciones adicionales para entender mejor los factores que afectan la acumulación de COS en diferentes ecosistemas y condiciones climáticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, S. M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. *Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo, 14*, 77 - 85. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121065>
- Alegre Oré, A. (2021). *Capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de suelo (COS) en diferentes sistemas de uso en bosque Montano, Chanchamayo - Perú*. Repositorio Académico - Universidad Científica del Sur. Tesis Licenciatura. Ingeniería Ambiental. doi:<https://doi.org/10.21142/tl.2021.2069>
- Alvarez, R., & Alvarez, C. R. (2001). Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the Humid Pampa of Argentina: estimation of carbon fluxes under climate change. *Biology and Fertility of Soils*, 282-285. doi:10.1007/s003740100408
- Amelung, W., Zech, W., Zhang, X., Follett, R. F., Tiessen, H., Knox, E., & Flach, K. W. (1998, January). Carbon, Nitrogen, and Sulfur Pools in Particle-Size Fractions as Influenced by Climate. *Soil Science Society of America Journal*, 172-181. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200010023x
- Andrade, H. J., Espinosa, E. L., & Moreno, H. A. (2014). Impacto del pastoreo en el almacenamiento de carbono orgánico de suelos en el Páramo de Anaime, Tolima, Colombia. *Zootecnia Tropical*, 7-21. Retrieved from <http://ve.scielo.org/pdf/zt/v32n1/art02.pdf>
- Andriulo, A., Sasal, C., & Rivero, M. L. (2001). Los sistemas de producción conservacionistas como mitigadores de la pérdida de carbono orgánico edáfico. *Siembra Directa II*, 17 - 28. <https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-AGRO:7550/Description>
- Armstrong, M., & Carignan, J. (1997). *Géostatistique linéaire: application au domaine minier*. Paris, Francia: Les Presses de l'École des Mines, Paris. https://books.google.com.pe/books/about/G%C3%A9ostatistique_lin%C3%A9aire.html?id=fGhEtmbv5_MC&redir_esc=y
- Ayala, J., Márquez, C., García, V., Recalde-Moreno, C. G., Rodríguez-Llerena, M. V., & Damián-Carrión, D. A. (2017, mayo). Land Cover Classification in an Ecuadorian

Mountain Geosystem Using a Random Forest Classifier, Spectral Vegetation Indices, and Ancillary Geographic Data. *Geosciences*. doi:doi.org/10.3390/geosciences7020034

Aybar-Camacho, C., Lavado-Casimiro, W., Sabino, E., Ramírez, S., & Huerta, J. &-O. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú – Guía Explicativa. In C. Aybar-Camacho, W. Lavado-Casimiro, E. Sabino, S. Ramírez, & J. &-O. Huerta, *Atlas de zonas de vida del Perú – Guía Explicativa*. (p. 30). Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-9.pdf

Bagyaraj, M., Ramkumar, T., Venkatramanan, S., & Gurugnan, B. (2013). Application of remote sensing and GIS analysis for identifying groundwater potential zone in parts of Kodaikanal Taluk, South India. *Frontiers of Earth Science*, 65–75. doi:10.1007/s11707-012-0347-6. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-012-0347-6>

Baker, C. J., Reicosky, D. C., Saxton, K. E., Ribeiro, M. F., & Hobbs, P. R. (2009). *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación (Primera ed.)*. Zaragoza - España: Editorial Acribia, S.A. Retrieved from <https://www.fao.org/3/al298s/al298s00.pdf>

Baldock, J., & Skjemstad, J. (1999). *Soil analysis: an interpretation manual*. Collingwood, Vic: CSIRO Publishing. Retrieved from <http://hdl.handle.net/102.100.100/210730?index=1>

Balima, L., Kouamé, F., Bayen, P., Ganamé, M., Nacoulma, B., Thiombiano, A., & Soro, D. (2021). Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa. *Environmental Challenges*, Volume 4, August 2021, 100123. doi: 10.1016/j.envc.2021.100123

Basaran, M., Erpul, G., Tercan, A., & Canga, M. (2008). The effects of land use changes on some soil properties in Indaği Mountain Pass--Cankiri, Turkey. *Environ Monit Assess*, 101–119. doi:10.1007/s10661-007-9668-4

- Basildo Martín, R. M., & López Nieves, P. (1998). Aproximación bibliográfica a los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Ordenación del Territorio y los Recursos Naturales. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, 319-335. Retrieved from <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9898110319A/31423>
- Batjes, N. H. (2016). Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 61-68. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.034
- Bojórquez Serrano, J. I., Castillo Pacheco, L. A., Hernández Jiménez, A., García Paredes, J. D., & Madueño Molina, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos Tropicales*, 63-69. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193243175008>
- Broadbent, F. E. (1953). The Soil Organic Fraction. *Advances in Agronomy*, 153 - 183. doi:10.1016/S0065-2113(08)60229-1
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil Genesis and Classification* (6 ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons Limited. doi:10.1002/9780470960622
- Burke, I. C., Yonker, C. M., Parton, W. J., Cole, C. V., Flach, K., & Schimel, D. (1989). Texture, Climate, and Cultivation Effects on Soil Organic Matter Content in U.S. Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 800-805. doi:10.2136/sssaj1989.03615995005300030029x
- Casanovas, E. M., Studdert, G. A., & Echeverría, H. (1995, enero). Soil organic matter under crop rotations. II. Effect of time under agriculture and pasture[Materia organica del suelo bajo rotaciones de cultivos. II. Efecto de los ciclos de agricultura y pastura. *Ciencia del Suelo*, 21 - 27. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/279906141_Soil_organic_matter_under_crop_rotations_II_Effect_of_time_under_agriculture_and_pastureMateria_organica_del_suelo_bajo_rotaciones_de_cultivos_II_Efecto_de_los_ciclos_de_agricultura_y_pastura?enrichId=rgr

- Chica Olmo, M. (1987). *Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales*. Granada, España: Universidad de Granada.
<https://digibug.ugr.es/handle/10481/28731>
- Chiles, J. P. (1999). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. New York: Wiley.
Retrieved from ISBN: 0471083151 9780471083153.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118136188>
- Chilès, J.-P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics : Modeling Spatial Uncertainty*. Publicado por Wiley & Sons, Incorporated, John, 1999. Retrieved from ISBN 10: 0471083151 ISBN 13: 9780471083153.
https://www.researchgate.net/publication/257619803_J-P_Chiles_P_Delfiner_Geostatistics_Modeling_Spatial_Uncertainty
- Choudhary, M., Sharma, P. C., Jat, H. S., Nehra, V., McDonald, A. J., & Garg, N. (2016). Crop residue degradation by fungi isolated from conservation agriculture fields under rice–wheat system of North-West India. *Int J Recycl Org Waste Agricult* , 349–360. doi:10.1007/s40093-016-0145-3
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Barcelona: Ariel, 2002.
https://www.researchgate.net/publication/318479860_Teledeteccion_ambiental-La_observacion_de_la_Tierra_desde_el_Espacio
- Condor Meza, J. (2019). Carbono orgánico del suelo en diferentes unidades fisiográficas del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) Tingo María – Perú. *Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.*, 228. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2057>
- Córdoba, M., Bruno, C., Aguacate, F., Tablada, M., & Balzarini, M. (2014). *Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas: Manual de Buenas Prácticas*. Córdoba, Argentina: Ed. Balzarini, M. Eudecor. Retrieved from https://www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2016/05/Libro-Buenas-Pr%C3%A1cticas_BALZARINI.pdf
- Cowen, D. J. (1988). GIS versus CAD versus DBMS: What are the Differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1551-1554.

Retrieved from https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/nov/1988_nov_1551-1555.pdf

- Cressie, N. (1991). *Statistics for Spatial Data*. New York: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781119115151
- D. S. N° 013-2010-AG. (2010). *Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/decreto-supremo/ds-2010/4804-decreto-supremo-no-013-2010-ag>
- D'Acqui, L. P., Pucci, A., & Janik, L. J. (2010, octubre). Soil properties prediction of western Mediterranean islands with similar climatic environments by means of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 865 - 876. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01301.x
- Dad, J. M. (2019). Organic carbon stocks in mountain grassland soils of northwestern Kashmir Himalaya: spatial distribution and effects of altitude, plant diversity and land use. *Carbon Management*, 149 - 162. doi:10.1080/17583004.2019.1568137
- Dad, M. j. (2019). Organic carbon stocks in mountain grassland soils of northwestern Kashmir Himalaya: spatial distribution and effects of altitude, plant diversity and land use. *Carbon Management*, 1-14. doi:10.1080/17583004.2019.1568137
- Davidson, E. A., & Ackerman, I. L. (1993, September). Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 20, 161–193. doi:10.1007/BF00000786
- De la Cruz , N. (1995). *Geología de los Cuadrangulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azangaro*. Lima: Intituto Geologico Minero y Metalurgico. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/179>
- De Sy, V., Herold, M., Achard, F., P Asner, G., Held, A., Kellndorfer, J., & Verbesselt, J. (2012). Synergies of multiple remote sensing data sources for REDD+ monitoring. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 696-706. doi:10.1016/j.cosust.2012.09.013
- Demmi, M. A., Puricelli, C. A., & Rosell, R. A. (1986). El efecto del pasto llorón en la recuperación de los suelos. *Información técnica N° 109*, 1 - 24. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cifumss.agro.bo/files/past
o-lloron.pdf

Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. (1998, enero). A new concept for a land cover classification system. *The Land*, 55 - 65. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/257312915_A_new_concept_for_a_land-cover_classification_system

Dueker, K. J. (1979). Land resource information systems: a review of fifteen years experience. *Geo-Processing*, 105-128. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133933263>

Earthdata - NASA. (2020). *Earthdata Open Access For Open Science*. Retrieved from <https://search.asf.alaska.edu>

Elizalde, G., Vilorio, J., & Jácome, A. (2000). *Elementos de Agrología: Fundamentos Teóricos para la Etapa I del Curso de Edafología Aplicada* (4 ed.). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf

Elliot, E. T., & Cambardella, C. A. (1991). Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 407-419. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90124-G](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90124-G)

Ersahin, S. (2003). Comparing Ordinary Kriging and Cokriging to Estimate Infiltration Rate. *Comparing Ordinary Kriging and Cokriging to Estimate Infiltration Rate*, 1848-1855. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1848>

FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i6937es/I6937ES.pdf>

FAO, (. , & UNEP, (. (1997). *Negotiating a Sustainable Future for Land. Structural and Institutional Guidelines for Land Resources Management in the 21st Century*. Roma:FAO.Obtenidodehttps://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/negotiat.pdf

- FAO, Food and Agriculture Organisation. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. *Informes sobre recursos mundiales de suelos*, 1 - 83. Retrieved from <https://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf>
- Fernández Delgado, M. (2019). *Cuantificación del carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca - 2018 (Tesis de licenciatura)*. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11537/21810>
- Ferreira, E. A., Bustamante, M. M., Resck, D. V., Célio de Figueiredo, C., Pinto, A., & Malaquias, J. V. (2016). Carbon Stocks in Compartments of Soil Organic Matter 31 Years after Substitution of Native Cerrado Vegetation by Agroecosystems. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. doi:10.1590/18069657rbc20150059
- Finstad, K., Smith, M., Beudoin, G., Dipple, G., & Aines, R. (2023). Radiocarbon analysis as a method for verifying atmospheric CO₂ uptake during carbon mineralization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms-Science Direct*, 35-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.10.026>
- Fisher, M. J. (2000). *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂*. Roma, Italia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/x4590s/x4590s.pdf>
- Florez, A. (2005). Manual de pastos y forrajes altoandinos. *Intermediate Technology Development Group (ITDG) - Oikos Cooperacao e Desenvolvimento (OIKOS)*, 53. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/07/Anexo-4.-Estudio-de-cobertura-vegetal-y-suelos.-consideraciones-y-contenidos-minimos-1-1.pdf](https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/07/Anexo-4.-Estudio-de-cobertura-vegetal-y-suelos.-consideraciones-y-contenidos-minimos-1-1.pdf)
- Font Quer, P. (2001). *Diccionario de botánica*. Península. <https://www.planetadelibros.com/libro-diccionario-de-botanica/312611>
- Galantini, J., & Rosell, R. A. (1997, junio). Organic fractions, N, P and S changes in an Argentine semiarid Haplustoll under different crop sequences. *Soil and Tillage Research*, 221-228. doi:10.1016/S0167-1987(97)00002-0

- Gamble, J. D., Feyereisen, G. W., Papiernik, S. K., Wente, C., & Baker, J. (2017). Regression-Kriged Soil Organic Carbon Stock Changes in Manured Corn Silage–Alfalfa Production Systems. *Soil & Water Management & Conservation*, 1 - 10. doi:10.2136/sssaj2017.04.0138
- Garnica, C. J., & Saldarriaga, S. (2015). *Diversidad funcional en un gradiente altitudinal*. Bogota: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Retrieved from repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4919/1/GarnicaDíazClaudiaJ
- Geoinformática y Sistemas Cia. Ltda. (2015). *Estudio del Estado Actual del Ecosistema Páramo en Tungurahua*. Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua (HGPT) - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (Cooperación Alemana para el Desarrollo). Retrieved from <https://rrnn.tungurahua.gob.ec/documentos/download/56cc8cc283ba883024c8c031>
- Ghiasi, Y., & Nafisi, V. (2016). Strain estimation using ordinary Kriging interpolation. *Survey Review*, 361-366. doi:10.1080/00396265.2015.1116155
- Ghimire, R., Lamichhane, S., Acharya, B. S., Bista, P., & Sainju, U. M. (2017). Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 1-15. doi:10.1016/S2095-3119(16)61337-0
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los Indices de Vegetación. *Revista de Teledetección*, 1-10. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/MaGilabert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a000000/Acerca-de-losindicesdevegetacion.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail
- Giraldo, R. (2003). *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*. Bogota, Colombia: Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia. https://geoinnova.org/libro/introduccion-a-la-geoestadistica-teoria-y-aplicacion/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwodC2BhAHEiwAE67hJEjYRbp8N8rRhbxB_2jPMdJt6VVkG6ROUn-6c9WevzHz4dhCqwA4BoCHSUQAvD_BwE

- Griffiths, R., Madritch, M. D., & Swanson, A. K. (2009). The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management*, 257, 1-7. doi:10.1016/j.foreco.2008.08.010
- Gualpa-Calva, M., Guadalupe-Arias, O., Rosero-Haro, S., & Morocho-Lema, V. (2019). Carbono almacenado en el suelo de dos sistemas de uso de la tierra de la Reserva Huayrapalte. *Dominio de las Ciencias*, 5(2), 143–162. doi:https://doi.org/10.23857/dc.v5i2.1082
- Gualpa-Calva, M., Guadalupe-Arias, O., Rosero-Haro, S., & Morocho-Lema, V. (2019). Carbono almacenado en el suelo de dos sistemas de uso de la tierra de la Reserva Huayrapalte. *Dominio De Las Ciencias*, 5(2), 143-162. doi: https://doi.org/10.23857/dc.v5i2.1082
- Hayashi , R., & Bettinger, P. (2006). Above ground biomass estimation in a forestland using a Landsat thematic mapper image with supervised regression analysis. *In Proceedings of the 5th Southern Forestry and Natural Resources GIS Conference*, 63-69. DOI:10.1155/2012/436537
- Hengl, T., Heuvelink, G., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*, 1301-1315. doi:doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001
- Herold, M., & Johns, T. (2007, agosto). Linking requirements with capabilities for deforestation monitoring in the context of the UNFCCC-REDD process. *Environmental Research Letters*. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045025
- Heuvelink, G., & Webster, R. (2001, mayo). Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*, 269-301. doi:10.1016/S0016-7061(01)00025-8
- Hevia, G. G., Buschiazzo, D. E., Hepper, E. N., Urioste, A. M., & Antón, E. L. (2003, Octubre). Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma*, 116, 265-277. doi:doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00104-6

- Hoosbeek , M. R., & Bryant, R. B. (1992). Towards the quantitative modeling of pedogenesis — a review. *Geoderma*, 55, 183 - 210. doi:doi.org/10.1016/0016-7061(92)90083-J
- Huaman, M. L., Espinoza, F., Barrial, A., & Ponce, Y. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 83-90. doi:10.17268/sci.agropecu.2021.010
- Huang, Y., & Wenjuan, S. (2006). Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. *Chinese Science Bulletin*, 1785 - 1803. doi:10.1007/s11434-006-2056-6
- Hunt, J. R., Celestina, C., & Kirkegaard, J. A. (2020). The realities of climate change, conservation agriculture, and soil carbon sequestration. *Global Change Biology*, 3188-3189. doi:10.1111/gcb.15082
- IDESEP. (2021, julio 01). *METADATOS GEOGRAFICOS SENAMHI - PERU*. Retrieved from <https://ideseq.senamhi.gob.pe>
- IGAC. (1999). Paisajes Fisiográficos de Orinoquía - Amazonía. *Análisis Geográficos*, 361. http://catalogo.humboldt.org.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=588&shelfbrowse_itemnumber=1095
- INGEMMET. (2018). <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>.
- IPCC. (2000). Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, OMM-PNUMA*, 1 - 30. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-sp.pdf>
- IPCC-(Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *Cambio Climático 2013*, 1 - 34. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf

- Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D., & Komlen, V. (2021). Influence of Slope Gradient and Aspect on Soil Organic Carbon Content in the Region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 13. doi:10.3390/su13158332
- Jansen, L. J., & Di Gregorio, A. (2000). Land Cover Classification System (LCCS). *Classification Concepts and User Manual*. https://www.researchgate.net/publication/229839605_Land_Cover_Classification_System_LCCS_Classification_Concepts_and_User_Manual
- Jia, X., Shao, M., Wei, X., Horton, R., & Li, X. (2011, enero 15). Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 160, 281-291. doi:10.1016/j.geoderma.2010.09.016
- Jobbágy, E. G., Sala, O. E., & Paruelo, J. M. (2002). Patterns and controls of primary production in the Patagonian Steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83, 307-319. doi:10.2307/2680015
- Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., & Nyssen, J. (24 de Junio de 2017). Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 273-282. doi:10.1016/j.agee.2017.06.034
- Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 137-142. doi:10.1016/j.still.2004.09.002
- Le Loc'H, G. (2005). Multivariate Geostatistics, CFSG course. *Centre de Géostatistique-Ecole des Mines de Paris*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-03098-1>
- Leonowicz, A., Wiesmann, S., & Grossmann, T. (2015). *GITTA - Geographic Information Technology Training Alliance*. Retrieved from <http://www.gitta.info/website/en/text/website.pdf>
- Le Quéré, C., Andrew, R., Canadell, J., Sitch, S., Korsbakken, J., Peters, G., . . . Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 605-649. doi:10.5194/essd-8-605-2016, 2016

- Lin, G.-F., & Chen, L.-H. (2004). A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model. *Journal of Hydrology*, 288-298. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.10.008
- Lis-Gutiérrez, M., Rubiano-Sanabria, Y., & Loaiza Usuga, J. C. (2019). Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena. *AUC Geographica*, 15 - 23. doi:10.14712/23361980.2019.2
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Páramos Andinos: Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos*. Retrieved from <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56475.pdf>
- Lozano-García, B., Parras-Alcántara, L., & Brevik, E. C. (2016). Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of the Total Environment*, 963–970. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.022
- Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., & Wang, E. (2017, mayo 19). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 4430 - 4439. doi:10.1111/gcb.13767
- Macias, F., & Camps Arbestain, M. (2010). Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 511-529. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-010-9231-4>
- Manlay, R. J., Feller, C., & Swift, M. J. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 217-233. https://www.researchgate.net/publication/222420758_Historical_evolution_of_soil_organic_matter_concepts_and_their_relationships_with_the_fertility_and_sustainability_of_cropping_systems
- Manojlović, M., Čabilovski, R., & Sitaula, B. (2011). Soil Organic Carbon in Serbian Mountain Soils: Effects of Land Use and Altitude. *Polish J. of Environ*, 977 - 986. <https://www.pjoes.com/Soil-Organic-Carbon-in-Serbian-Mountain-Soils-r-nEffects-of-Land-Use-and-Altitude,88641,0,2.html>

- Martínez H., E., Fuentes E., J., & Acevedo H., E. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *SciELO Analytics*, 68-96. doi:10.4067/S0718-27912008000100006
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono Organico y Propiedades del Suelo. *R.C.Suelo Nutr. Veg.*, 68-96. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>
- Martinez-Vargas, A., & Ramírez-Garcia, J. (2005). Desarrollo actual de la geoestadística en el mundo. *Minería y Geología*, 4. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223516052001>
- Mena, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Lasso B., S., . . . Ortiz, D. (2011). *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. Quito, ECUADOR: Abya-Yala. Retrieved from <http://www.abayayala.org>
- MIDAGRI. (n.d.). DS N° 017-2009-AG. *Reglamento de Clasificación de tierras por su Capacidad de uso Mayor*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.midagri.gob.pe/porta/download/pdf/reglamento-ctcum-junio2018.pdf>
- Minasny, B. B., & McBratney, A. B. (2007, agosto). Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. *Geoderma*, 140, 324-336. doi:doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.028
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (1999). A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development. *Geoderma*, 90, 3-21. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00115-3)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*. Bogota, Colombia. Retrieved from https://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Mapa Nacional de ecosistemas del Perú*. Lima: Ministerio del Ambiente. Retrieved from <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>

- Mondal , A., Khare, D., Kundu, S., Mondal, M., Mukherjee, S., & Mukhopadhyay, A. (2017). Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 61-70. doi:10.1016/j.ejrs.2016.06.004
- Montero, J., & Larraz-Iribas, B. (2008). *Introducción a la geoestadística lineal*. La Coruña, España: Netbiblo. https://www.researchgate.net/publication/290567006_Introduccion_a_la_Geoestadistica_Lineal
- Munesh Kumar, M., & Bussmann, R. (2009). Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance and Management Open Access Research*, 4(1):6. doi:DOI:10.1186/1750-0680-4-6
- NCGIA, (. C. (1990). NCGIA Core Curriculum in GIS. Goodchild, M. F. y K. K. Kemp, (eds.). *National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, CA*. <https://spatial.ucsb.edu/research/national-center-geographic-information-and-analysis-ncgia>
- Olaya, V. (2009). Chapter 6 Basic Land-Surface Parameters. *Developments in Soil Science*, 33, 141-169. doi:10.1016/S0166-2481(08)00006-8
- Oliva, M., Pérez Torres, R., Salas, R., Gamarra, O., Leiva, S., Collazos, R., & Maicelo Quintana, J. L. (2017). Cuantificación del área de pajonal de las microcuencas de Gocta y Chinata y su potencial como reserva de carbono. *Scientia Agropecuaria*, 233 – 241. doi:10.17268/sci.agropecu.2017.03.06
- Olson, K. R., Al-Kaisi, M. M., Lal, R., & Lowery, B. (2014, Marzo 28). Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 348–360. doi:10.2136/sssaj2013.09.0412
- Ordóñez, J. B., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 3-12. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770102>

- Pandian, E., & Ravichandran, P. (2020). Altitudinal variation of soil organic carbon stock in tropical forest of Courtallam hills, Southern Western Ghats of India. *Tropical Plant Research* 7(3), 702-714. doi:DOI:10.22271/tpr.2020.v7.i3.089
- Penman, J., Gytarsky, M., Taka, H., Krug, T., & Kruger, D. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-for-land-use-land-use-change-and-forestry/>
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M., & Roquero de Laburo, C. (2003). *Edafología para Agricultura y Medio Ambiente* (3 ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. https://catoute.unileon.es/discovery/fulldisplay/alma991008769488805772/34BUC_ULE:VU1
- Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., & Stangenberger, A. G. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156-159. doi:10.1038/298156a0
- Quesada, C. A., Paz, C., Oblitas Mendoza, E., Lawrence Phillips, O., Saiz, G., & Lloyd, J. (2020). Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. *Soil*, 53 - 88. doi:10.5194/soil-6-53-2020
- Quiceno Urbina, N. J., Tangarife Marín, G. M., & Álvarez León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul* , 171-202. doi:10.17151/luaz.2016.43.9
- Quispe Navarro, C. M., Quispe Contreras, F., & Yaranga Cano, R. M. (2015). Almacenamiento de carbono en pastos naturales de la subcuenca del Canipaco, Huancayo. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 228-227. doi:10.18259/acs.2015032
- Richards, G. (2003, noviembre). The expanding role of remote sensing in greenhouse gas accounting. *30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/greenhousegas_emissions

- Robert, M. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management*. Roma, Italia: Institut national de recherche agronomique. Retrieved from <https://www.fao.org/3/bl001e/bl001e.pdf>
- Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97-108. doi:doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.003
- Rosell, R. A. (1999). Materia orgánica, fertilidad de suelos y productividad de cultivos. *XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Pucón, Chile. https://www.researchgate.net/publication/278726976_Materia_organica_en_el_suelo_y_disponibilidad_de_nitrogeno
- Samper, F., & Carrera, J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. Barcelona, España: CIMNE. <https://books.cimne.com/product/geoestadistica-aplicaciones-a-la-hidrologia-subterranea/>
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., . . . Current, D. (2012, octubre). Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *JOURNAL OF SOIL AND WATER CONSERVATION*, 128A - 136A. doi:10.2489/jswc.67.5.128A
- Schulp, C., & Verburg, P. (2009, septiembre). Effect of land use history and site factors on spatial variation of soil organic carbon across a physiographic region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 86-97. doi:10.1016/j.agee.2009.05.005
- SENAMHI. (2021). <https://idesep.senamhi.gob.pe/portaledesep/>. Retrieved from IDESEP: <https://www.gob.pe/senamhi>
- Silleos, G., Alexandridis, T., Gitas, I. Z., & Perakis, K. (2006). Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto International*, 21 - 28. doi:10.1080/10106040608542399
- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., . . . Pugh, T. A. (2016). Global Change Pressures on Soils from Land Use and Management. *Global Change Biology*, 1008-1028. doi:10.1111/gcb.13068

- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys* (2 ed.). Washington D. C. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00008.x>
- Solano, M., Ramon, P., Gusman, E., Burneo, J., Quichimbo, P., & Jiménez, L. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas decarbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Ecosistemas*, 116-122. doi:10.7818/ECOS.1521
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/the-chemistry-of-soils-9780195313697?cc=pl&lang=en&>
- Sreenivas, K., Dadhwal, V. K., Kumar, S., Sri Harsha, G., Mitran, T., Sujatha, G., . . . Ravisankar, T. (2016). Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma*, 160-173. doi:10.1016/j.geoderma.2016.02.002
- Stockfisch, N., Forstreuter, T., & Ehlers, W. (1999). Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research*, 52, 91-101. doi:10.1016/S0167-1987(99)00063-X
- Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 171-177. doi:10.21704/rea.v15i2.756
- Suárez, A. E. (2014). Análisis y comparación de imágenes de diferentes sensores para verificar su eficiencia y utilidad en estudios multitemporales. *Tesis*. <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8546?locale=en>
- Susmita , D. (2010). Land Use Change Effect on Soil Organic Carbon Stock in Balkhu Khola Watershed Southwestern Part of Kathmandu Valley, Central Nepal. 66. doi:10.13140/RG.2.1.4383.0243
- Tan, Q., Han, W., Li, X., & Wang, G. (2020). Clarifying the response of soil organic carbon storage to increasing temperature through minimizing the precipitation effect. *Geoderma* 374:114398. doi:DOI:10.1016/j.geoderma.2020.114398
- USDA. (2017). *Soil Survey Manual*. Retrieved from <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre50.pdf>

- USDA-NRCS. (2014). Soil Health- Guides for Educators Soil Bulk Density, Moisture, Aeration. 1 - 11. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health/soil-health-educators-guide>
- USGS. (2021, ABRIL). <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Ussiri, D., & Lal, R. (2013). Land Management Effects on Carbon Sequestration and Soil Properties in Reclaimed Farmland of Eastern Ohio, USA. *Open Journal of Soil Science*, 46-57. doi:10.4236/ojss.2013.31006
- Van Bemmelen, J. M. (1890). Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. *Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen*, 279-290. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/211282>
- Walkley, A., & Black, A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 29 - 38. doi:10.1097/00010694-193401000-00003
- Wang, F.-p., Wang, X.-c., Yao, B.-Q., Zhang, Z.-h., Shi, G.-x., Ma, Z., . . . Zhou, H.-k. (2018). Effects of land-use types on soil organic carbon stocks: a case study across an altitudinal gradient within a farm-pastoral area on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2693 - 2702. doi:10.1007/s11629-018-4980-8
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd Edition. Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd. Retrieved from http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/33547/1/Richard%20Webster_2007.pdf
- Yajuan, W., Meiying, L., Ji , W., Xiaohong, D., & Yanlong, H. (2022). The effects of vegetation communities on soil organic carbon stock in an enclosed desert-steppe region of northern China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 284-294. doi:10.1080/00380768.2022.2045847



- Yang, R.-M., Zhang, G.-L., Liu, F., Lu, Y.-Y., Yang, F., Yang, F., . . . Li, D.-C. (2016, enero). Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem. *Ecological Indicators*, 870-878. doi:10.1016/j.ecolind.2015.08.036
- Yang, Y., Mohammat, A., Feng, J., Zhou, R., & Fang, J. (2007). Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 131-141. doi:10.1007/s10533-007-9109-z
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V., Segura-Castruita, M. Á., García-Carrillo, M., Hernández-Hernández, V., & González-Cervantes, G. (2018). Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 591 - 610. doi:10.18268/bsgm2018v70n3a2
- Zamora Morales, B. P., Mendoza Cariño, M., Sangerman Jarquín, D. M., Quevedo Nolasco, A., & Navarro Bravo, A. (2019). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 155-164. doi:10.29312/remexca.v10i1.1733
- Zhu, A. X., Liu, J., Du, F., Zhang, S. J., Qin, C. Z., Burt, J., . . . Scholten, T. (2015, abril). Predictive soil mapping with limited sample data. *European Journal of Soil Science*, 535-547. doi:10.1111/ejss.12244

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Planteamiento del problema	Hipótesis específica	Objetivos específicos	VARIABLES	Indicadores	Prueba estadística
¿Es probable identificar las variables ambientales representativas en la determinación de carbono orgánico del suelo?	En la determinación de carbono orgánico del suelo es probable identificar variables ambientales representativas.	Identificar las variables ambientales representativas en la determinación de carbono orgánico del suelo	Influencia de factores ambientales: altitud, precipitación, temperatura, y materia orgánica	Relación de COS con materia orgánica del suelo, altitud, precipitación y temperatura.	Coefficiente de correlación de Pearson
¿Es viable estimar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo?	La estimación de la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo es viable mediante el método geoestadístico de Kriging Ordinario	Estimar la variabilidad espacial de carbono orgánico del suelo mediante el método probabilístico de Kriging Ordinario	Estimación de carbono orgánico a tres profundidades del suelo 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm	El contenido de carbono orgánico del suelo es influenciado por clima, cobertura vegetal y uso de la tierra.	Aplicación del método geoestadístico de Kriging Ordinario
¿Es posible modelar el carbono orgánico del suelo mediante la superposición ponderada de variables ambientales y el uso de la tierra?	Es posible modelar el carbono orgánico del suelo mediante la superposición ponderada de variables ambientales y uso de la tierra	Modelar el carbono orgánico del suelo por superposición ponderada de variables ambientales y uso de la tierra	Modelado de carbono orgánico del suelo a tres profundidades 0-20 cm, 20-45 cm y 45-105 cm.	Integración de variables climática y uso de la tierra	Aplicación técnica de superposición ponderada de mapas temáticos en ArcMap.

Anexo 2 Determinación de reservas de carbono orgánico del suelo

Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)	COD	COD_HZ	M.O. %	Prof. Hz (m)	Da (kg C/m ³)	COS (g/g)	FCpd	COSr/HZ (Kg C/m ²)
355363	8347490	4113	SU-30	SU-30-1	9.15	0.25	1190	0.0531	0.89	14.05
355363	8347490	4113	SU-30	SU-30-2	6.8	0.4	1320	0.0394	0.87	18.12
355363	8347490	4113	SU-30	SU-30-3	3.14	0.6	1330	0.0182	0.92	13.37
355002	8348489	4202	SU-32	SU-32-1	6.54	0.18	1020	0.0379	0.9	6.27
355002	8348489	4202	SU-32	SU-32-2	3.27	0.1	1180	0.0190	0.87	1.95
355002	8348489	4202	SU-32	SU-32-3	1.18	0.17	1350	0.0068	0.92	1.45
355708	8348268	4241	SU-33	SU-33-1	3.79	0.2	1490	0.0220	0.92	6.03
355708	8348268	4241	SU-33	SU-33-2	3.73	0.37	1540	0.0216	0.36	4.44
355641	8347846	4143	SU-35	SU-35-1	2.88	0.2	1450	0.0167	0.85	4.12
355641	8347846	4143	SU-35	SU-35-2	2.16	0.25	1370	0.0125	0.78	3.35
355641	8347846	4143	SU-35	SU-35-3	0.85	0.3	1560	0.0049	0.7	1.62
354838	8347688	4209	SU-36	SU-36-1	3.14	0.2	1230	0.0182	0.77	3.45
354838	8347688	4209	SU-36	SU-36-2	0.52	0.41	800	0.0030	0.55	0.54
354838	8347688	4209	SU-36	SU-36-3	0.2	0.29	1490	0.0012	0.38	0.19
356642	8348136	4303	SU-37	SU-37-1	4.44	0.16	1080	0.0258	0.85	3.78
356642	8348136	4303	SU-37	SU-37-2	3.53	0.13	1160	0.0205	0.75	2.32
356642	8348136	4303	SU-37	SU-37-3	1.57	0.53	1190	0.0091	0.8	4.59
356642	8348136	4303	SU-37	SU-37-4	0.65	0.53	1260	0.0038	0.8	2.01
356635	8348817	4349	SU-38	SU-38-1	6.73	0.18	1150	0.0390	0.85	6.87
356635	8348817	4349	SU-38	SU-38-2	1.24	0.24	1190	0.0072	0.82	1.68
356635	8348817	4349	SU-38	SU-38-3	0.52	0.8	1440	0.0030	0.85	2.95
356016	8347571	4152	SU-39	SU-39-1	2.03	0.18	1490	0.0118	0.9	2.84
356016	8347571	4152	SU-39	SU-39-2	2.22	0.24	1590	0.0129	0.85	4.18
356016	8347571	4152	SU-39	SU-39-3	2.55	0.62	1350	0.0148	0.9	11.14
356794	8346781	4271	SU-40	SU-40-1	3.2	0.18	1250	0.0186	0.9	3.76
356794	8346781	4271	SU-40	SU-40-2	1.7	0.2	1390	0.0099	0.85	2.33
356794	8346781	4271	SU-40	SU-40-3	0.26	0.57	1450	0.0015	0.88	1.10
355876	8346548	4111	SU-41	SU-41-1	6.99	0.18	1130	0.0405	0.8	6.60
355876	8346548	4111	SU-41	SU-41-2	3.79	0.24	1280	0.0220	0.4	2.70
355876	8346548	4111	SU-41	SU-41-3	0.92	0.2	1370	0.0053	0.7	1.02
355876	8346548	4111	SU-41	SU-41-4	0.2	0.38	1430	0.0012	0.85	0.54
355611	8346625	4068	SU-42	SU-42-1	6.67	0.18	1040	0.0387	0.85	6.16
355611	8346625	4068	SU-42	SU-42-2	3.6	0.2	1250	0.0209	0.57	2.98
355611	8346625	4068	SU-42	SU-42-3	1.11	0.23	1380	0.0064	0.88	1.80
355611	8346625	4068	SU-42	SU-42-4	1.96	0.59	1280	0.0114	0.9	7.73
355771	8345996	4067	SU-43	SU-43-1	3.2	0.18	1540	0.0186	0.85	4.37
355771	8345996	4067	SU-43	SU-43-2	0.65	0.23	1540	0.0038	0.6	0.80
355771	8345996	4067	SU-43	SU-43-3	0.39	0.49	1540	0.0023	0.55	0.94
356297	8344639	3984	SU-44	SU-44-1	5.1	0.13	1270	0.0296	0.77	3.76
356297	8344639	3984	SU-44	SU-44-2	0.85	0.22	1360	0.0049	0.62	0.91

Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)	COD	COD_HZ	M.O. %	Prof. Hz (m)	Da (kg C/m ³)	COS (g/g)	FCpd	COSr/HZ (Kg C/m ²)
356297	8344639	3984	SU-44	SU-44-3	0.39	0.15	1610	0.0023	0.53	0.29
356297	8344639	3984	SU-44	SU-44-4	0.33	0.4	1400	0.0019	0.47	0.50
356297	8344639	3984	SU-44	SU-44-5	0.07	0.35	1410	0.0004	0.5	0.10
356688	8345069	4066	SU-45	SU-45-1	6.21	0.18	1110	0.0360	0.89	6.41
356688	8345069	4066	SU-45	SU-45-2	1.9	0.24	1270	0.0110	0.35	1.18
356688	8345069	4066	SU-45	SU-45-3	0.52	0.31	1480	0.0030	0.57	0.79
356688	8345069	4066	SU-45	SU-45-4	0.07	0.32	1460	0.0004	0.64	0.12
356688	8345069	4066	SU-45	SU-45-5	0.26	0.45	1410	0.0015	0.62	0.59
357315	8345451	4134	SU-46	SU-46-1	2.29	0.18	1260	0.0133	0.92	2.77
357315	8345451	4134	SU-46	SU-46-2	1.83	0.25	1320	0.0106	0.88	3.08
357315	8345451	4134	SU-46	SU-46-3	1.18	0.24	1330	0.0068	0.9	1.97
357315	8345451	4134	SU-46	SU-46-4	0.85	0.26	1350	0.0049	0.85	1.47
357315	8345451	4134	SU-46	SU-46-5	1.9	0.57	1350	0.0110	0.92	7.80
357772	8343974	3929	SU-47	SU-47-1	2.75	0.2	1320	0.0160	0.85	3.58
357772	8343974	3929	SU-47	SU-47-2	0.59	0.4	1420	0.0034	0.5	0.97
357772	8343974	3929	SU-47	SU-47-3	0.07	0.45	1530	0.0004	0.6	0.17
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-1	2.94	0.2	1190	0.0171	0.92	3.73
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-2	2.61	0.31	1300	0.0151	0.9	5.49
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-3	1.5	0.12	1380	0.0087	0.91	1.31
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-4	2.03	0.29	1300	0.0118	0.88	3.91
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-5	0.78	0.27	1330	0.0045	0.85	1.38
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-6	0.59	0.21	1300	0.0034	0.92	0.86
357718	8343501	3898	SU-48	SU-48-7	0.39	0.25	1270	0.0023	0.6	0.43
357054	8343322	3907	SU-49	SU-49-1	2.94	0.16	1290	0.0171	0.92	3.24
357054	8343322	3907	SU-49	SU-49-2	0.78	0.13	1470	0.0045	0.91	0.79
357054	8343322	3907	SU-49	SU-49-3	0.52	0.23	1430	0.0030	0.85	0.84
357054	8343322	3907	SU-49	SU-49-4	0.72	0.43	1430	0.0042	0.88	2.26
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-1	1.9	0.14	1330	0.0110	0.92	1.89
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-2	0.92	0.18	1470	0.0053	0.94	1.33
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-3	2.35	0.3	1110	0.0136	0.97	4.40
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-4	0.33	0.19	1640	0.0019	0.95	0.57
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-5	2.16	0.29	1190	0.0125	0.97	4.19
357167	8344407	3967	SU-50	SU-50-6	1.18	0.4	1220	0.0068	0.97	3.24
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-1	2.94	0.2	1330	0.0171	0.87	3.95
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-2	1.31	0.13	1460	0.0076	0.9	1.30
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-3	2.03	0.25	1250	0.0118	0.95	3.50
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-4	0.59	0.27	1280	0.0034	0.94	1.11
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-5	0.72	0.26	1220	0.0042	0.93	1.23
357636	8343113	3895	SU-51	SU-51-6	0.98	0.34	1250	0.0057	0.95	2.30

Anexo 3 Variabilidad espacial de carbono orgánico con profundidad del suelo

Ubicación - UTM			Elevación msnm	COS (Kg/m ²)		
Código	Este (m)	Norte (m)		0-20 cm	20-45 cm	45-105 cm
SU-31	355,363	8,347,490	4113	-	-	13.37
SU-32	355,002	8,348,489	4202	6.27	1.95	1.45
SU-33	355,708	8,348,268	4241	6.03	-	-
SU-35	355,641	8,347,846	4143	4.12	3.35	1.62
SU-36	354,838	8,347,688	4209	3.45	-	0.19
SU-37	356,642	8,348,136	4303	3.78	2.32	4.59
SU-38	356,635	8,348,817	4349	6.87	1.68	2.95
SU-39	356,016	8,347,571	4152	2.84	4.18	11.14
SU-40	356,794	8,346,781	4271	3.76	2.33	1.10
SU-41	355,876	8,356,548	4111	6.60	2.70	1.02
SU-42	355,611	8,346,625	4068	6.16	2.98	1.80
SU-43	355,771	8,345,996	4067	4.37	0.80	0.94
SU-44	356,297	8,344,639	3984	3.76	0.91	0.29
SU-45	356,688	8,345,069	4066	6.41	1.18	0.79
SU-46	357,315	8,345,451	4134	2.77	3.08	1.97
SU-47	357,772	8,343,974	3929	3.58	-	0.17
SU-48	357,772	8,343,501	3898	3.73	-	1.31
SU-49	357,054	8,343,322	3907	3.24	0.79	0.84
SU-50	357,167	8,344,407	3967	1.89	1.33	4.40
SU-51	357,637	8,343,113	3895	3.95	1.30	3.50
Número de muestras normalizadas				19	15	19

Anexo 4 *Panel fotográfico*



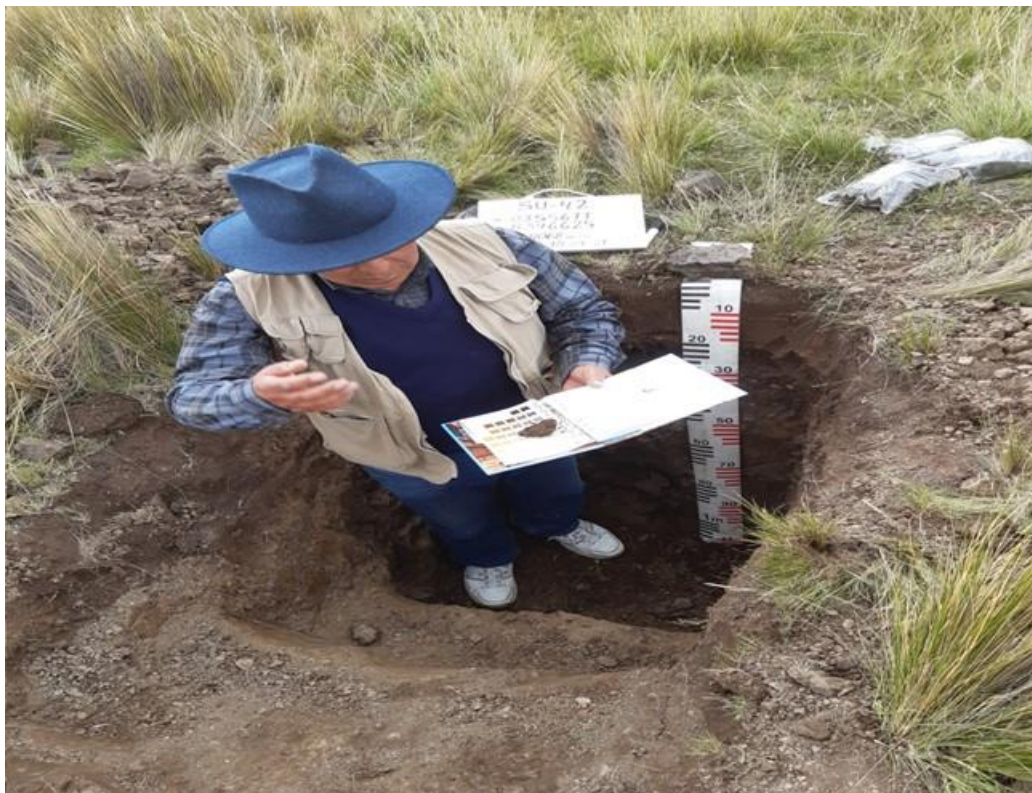
Parte baja con pasturas naturales



Parte baja con cultivo de avena



Perfil del suelo en zona baja



Perfil del suelo en zona intermedia



Perfil del suelo en zona alta

Anexo 5 Análisis de caracterización de suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI
Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA
Referencia : H.R. 74619-067C-21

Bolt: 4630

Provincia : AZÁNGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO
Fecha : 16/07/2021

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
5436	SU-30, MUESTRA 1	5.00	0.03	0.00	9.15	4.7	171	69	20	11	Fr.A.	28.16	21.20	2.15	0.54	0.09	0.15	24.13	23.98	85
5437	SU-30, MUESTRA 2	6.21	0.26	0.00	6.80	5.5	91	51	28	21	Fr.	30.40	26.05	1.85	0.27	0.23	0.00	28.40	28.40	93
5438	SU-30, MUESTRA 3	6.53	0.43	0.00	3.14	2.0	110	29	34	37	Fr.Ar.	13.44	11.34	1.15	0.22	0.14	0.00	12.84	12.84	96
5439	SU-32, MUESTRA 1	4.64	0.04	0.00	6.54	2.2	133	45	42	13	Fr.	13.76	2.78	0.78	0.30	0.10	0.85	4.81	3.96	29
5440	SU-32, MUESTRA 2	5.04	0.02	0.00	3.27	2.2	73	43	38	19	Fr.	12.32	2.38	0.85	0.15	0.23	1.60	5.21	3.61	29
5441	SU-32, MUESTRA 3	5.32	0.07	0.00	1.18	3.8	60	41	32	27	Fr.Ar.	7.20	1.71	1.12	0.13	0.25	0.55	3.76	3.21	45
5442	SU-33 MUESTRA 1	4.28	0.04	0.00	3.79	3.3	103	77	18	5	A.Fr.	8.96	2.16	0.43	0.29	0.08	1.55	4.51	2.98	33
5443	SU-33 MUESTRA 2	4.40	0.02	0.00	3.73	3.4	70	75	20	5	Fr.A.	9.60	2.64	0.30	0.22	0.10	2.15	5.40	3.25	34
5444	SU-35 MUESTRA 1	4.20	0.04	0.00	2.88	5.5	69	65	26	9	Fr.A.	8.32	1.81	0.53	0.18	0.08	0.95	3.56	2.61	31
5445	SU-35 MUESTRA 2	4.60	0.02	0.00	2.16	5.8	54	69	24	7	Fr.A.	7.36	1.34	0.63	0.12	0.08	0.75	2.92	2.17	29
5446	SU-35 MUESTRA 3	5.72	0.04	0.00	0.85	8.5	67	63	22	15	Fr.A.	5.60	2.06	1.20	0.14	0.11	0.05	3.59	3.54	63

A = Arena; A.Fr. = Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; Fr. = Franco; Fr.L. = Franco Limoso; L. = Limoso; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso; Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso



Constantino Calvarón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI
Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA
Referencia : H.R. 74619-067C-21

Bolt: 4630

Provincia : AZÁNGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO
Fecha : 16/07/2021

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
5447	SU-36 MUESTRA 1	4.80	0.05	0.00	3.14	2.7	106	55	32	13	Fr.A.	6.72	2.00	1.02	0.29	0.06	0.40	3.76	3.36	50
5448	SU-36 MUESTRA 2	5.24	0.06	0.00	0.52	4.3	50	59	28	13	Fr.A.	3.68	1.75	1.12	0.12	0.03	0.10	3.12	3.02	82
5449	SU-36 MUESTRA 3	5.28	0.05	0.00	0.20	3.4	54	59	26	15	Fr.A.	4.64	2.25	1.47	0.14	0.05	0.10	4.01	3.91	84
5450	SU-37 MUESTRA 1	4.40	0.07	0.00	4.44	2.5	101	33	40	27	Fr.Ar.	11.68	1.79	0.92	0.24	0.06	1.55	4.56	3.01	26
5451	SU-37 MUESTRA 2	4.48	0.02	0.00	3.53	2.3	53	39	38	23	Fr.	12.80	2.46	0.47	0.15	0.09	2.55	5.72	3.17	25
5452	SU-37 MUESTRA 3	4.80	0.02	0.00	1.57	3.1	43	27	38	35	Fr.Ar.	9.92	1.73	1.17	0.14	0.10	1.50	4.63	3.13	32
5453	SU-37 MUESTRA 4	4.68	0.02	0.00	0.85	3.0	45	29	36	35	Fr.Ar.	8.96	2.43	2.50	0.14	0.10	0.75	5.92	5.17	58
5454	SU-38 MUESTRA 1	4.72	0.05	0.00	6.73	2.4	118	41	42	17	Fr.	13.92	2.62	2.50	0.32	0.10	0.80	6.33	5.53	40
5455	SU-38 MUESTRA 2	4.84	0.30	0.00	1.24	2.3	61	13	38	49	Ar.	8.48	1.78	2.30	0.11	0.10	0.10	4.39	4.29	51
5456	SU-38 MUESTRA 3	6.24	0.25	0.00	0.52	4.4	52	41	26	33	Fr.Ar.	5.92	3.15	2.18	0.11	0.10	0.00	5.53	5.53	93

A = Arena; A.Fr. = Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; Fr. = Franco; Fr.L. = Franco Limoso; L. = Limoso; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso; Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso



Constantino Calvarón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI

Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA

Provincia : AZANGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO

Referencia : H.R. 74819-067C-21

Bolt: 4630

Fecha : 16/07/2021

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiadas					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
5467	SU-42 MUESTRA 1	4.24	0.87	0.00	6.67	2.3	283	41	38	21	Fr	15.20	3.54	3.25	0.59	0.32	0.50	8.21	7.71	51
5468	SU-42 MUESTRA 2	4.20	7.01	0.00	3.60	2.7	219	33	36	31	Fr.Ar	13.28	4.86	2.35	0.52	0.25	0.30	8.28	7.88	60
5469	SU-42 MUESTRA 3	4.36	2.69	0.00	1.11	5.3	88	19	44	37	Fr.Ar.L	8.18	3.89	1.03	0.14	0.30	0.20	5.36	5.16	63
5470	SU-42 MUESTRA 4	4.89	1.08	0.00	1.96	3.0	76	11	36	53	Ar	12.16	5.78	3.37	0.12	0.38	0.10	9.75	9.65	79
5471	SU-43 MUESTRA 1	4.66	0.14	0.00	3.20	6.8	85	89	24	7	Fr.A	10.56	6.34	2.00	0.22	0.07	0.10	8.73	8.63	82
5472	SU-43 MUESTRA 2	5.40	0.03	0.00	0.65	4.8	43	51	36	13	Fr	7.36	5.02	1.48	0.09	0.10	0.10	6.79	6.69	91
5473	SU-43 MUESTRA 3	6.00	0.03	0.00	0.39	9.6	53	49	32	19	Fr	8.80	4.61	2.67	0.17	0.15	0.00	7.60	7.60	86
5474	SU-44 MUESTRA 1	5.00	0.19	0.00	5.10	3.5	153	55	30	15	Fr.Ar	12.16	8.22	1.32	0.42	0.06	0.10	10.12	10.02	82
5475	SU-44 MUESTRA 2	7.45	0.24	4.29	0.85	6.3	56	37	30	33	Fr.Ar	8.00	7.27	0.57	0.11	0.05	0.00	8.00	8.00	100
5476	SU-44 MUESTRA 3	7.69	0.18	1.91	0.39	4.4	61	59	24	17	Fr.Ar	7.20	8.58	0.42	0.13	0.07	0.00	7.20	7.20	100
5477	SU-44 MUESTRA 4	7.73	0.18	1.91	0.33	4.7	59	47	38	17	Fr	8.00	7.15	0.62	0.16	0.07	0.00	8.00	8.00	100
5478	SU-44 MUESTRA 5	7.69	0.18	0.57	0.07	10.1	65	45	38	17	Fr	8.80	7.79	0.73	0.18	0.10	0.00	8.80	8.80	100

A = Arena; A.F. = Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; Fr. = Franco; Fr.L. = Franco Limoso; L = Limoso; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso; Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI

Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA

Provincia : AZANGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO

Referencia : H.R. 74819-067C-21

Bolt: 4630

Fecha : 16/07/2021

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiadas					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
5479	SU-45 MUESTRA 1	4.60	0.10	0.00	6.21	2.7	221	51	40	9	Fr.	12.80	4.22	1.82	0.66	0.07	0.30	7.07	6.77	53
5480	SU-45 MUESTRA 2	4.96	0.03	0.00	1.90	3.4	75	47	28	25	Fr.	9.12	4.13	2.50	0.16	0.09	0.15	7.03	6.88	75
5481	SU-45 MUESTRA 3	5.72	0.04	0.00	0.52	4.0	47	57	20	23	Fr.Ar.A	6.40	2.86	2.03	0.37	0.12	0.10	5.50	5.40	84
5482	SU-45 MUESTRA 4	6.20	0.04	0.00	0.07	4.5	39	39	40	21	Fr.	4.80	2.74	1.68	0.08	0.10	0.00	4.60	4.60	96
5483	SU-45 MUESTRA 5	6.12	0.09	0.00	0.26	4.9	53	33	38	29	Fr.Ar	7.20	4.22	2.45	0.09	0.11	0.00	6.88	6.88	95
5484	SU-46 MUESTRA 1	5.20	0.29	0.00	2.29	5.8	106	31	38	31	Fr.Ar	8.32	3.65	2.32	0.18	0.07	0.10	6.32	6.22	75
5485	SU-46 MUESTRA 2	5.56	0.14	0.00	1.83	3.0	71	21	46	33	Fr.Ar	7.20	3.10	2.28	0.13	0.09	0.10	5.70	5.60	78
5486	SU-46 MUESTRA 3	5.76	0.12	0.00	1.18	3.4	56	17	46	37	Fr.Ar.L	8.32	4.66	1.72	0.12	0.07	0.05	6.62	6.57	79
5487	SU-46 MUESTRA 4	6.16	0.15	0.00	0.85	4.1	47	39	34	27	Fr.Ar	6.08	3.33	2.08	0.09	0.08	0.00	5.58	5.58	92
5488	SU-46 MUESTRA 5	6.52	0.33	0.00	1.90	6.7	81	23	32	45	Ar.	10.40	7.60	1.87	0.12	0.11	0.00	9.90	9.90	95

A = Arena; A.F. = Arena Franca; Fr.A. = Franco Arenoso; Fr. = Franco; Fr.L. = Franco Limoso; L = Limoso; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso; Fr.Ar. = Franco Arcilloso; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso; Ar.A. = Arcillo Arenoso; Ar.L. = Arcillo Limoso; Ar. = Arcilloso



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI

Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA

Provincia : AZANGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO
Fecha : 16/07/2021

Referencia : H.R. 74619-067C-21

Bolt.: 4630

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dSm	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ar ⁺ + H ⁺			
5489	SU-47 MUESTRA 1	5.20	0.12	0.00	2.75	8.5	294	55	28	17	Fr.A.	10.88	5.63	2.30	0.77	0.12	0.10	8.92	8.82	81
5490	SU-47 MUESTRA 2	6.32	0.23	0.00	0.59	6.7	202	41	22	37	Fr.Ar.	9.92	5.62	3.15	0.51	0.10	0.00	9.38	9.38	95
5491	SU-47 MUESTRA 3	7.54	0.65	17.17	0.07	6.5	110	45	32	23	Fr.	4.80	1.96	2.40	0.26	0.17	0.00	4.80	4.80	100
5492	SU-48 MUESTRA 1	4.64	1.30	0.00	2.94	8.0	117	27	46	27	Fr.Ar.	12.80	6.81	2.50	0.33	0.06	0.10	9.80	9.70	76
5493	SU-48 MUESTRA 2	5.73	0.25	0.00	2.81	7.4	76	21	50	29	Fr.Ar.	15.36	9.58	3.35	0.25	0.13	0.05	13.36	13.31	87
5494	SU-48 MUESTRA 3	6.73	0.43	0.00	1.50	6.5	81	15	34	51	Ar.	12.00	8.22	3.00	0.16	0.12	0.00	11.50	11.50	96
5495	SU-48 MUESTRA 4	7.17	0.66	0.00	2.03	14.2	122	35	28	37	Fr.Ar.	23.20	18.88	3.75	0.31	0.26	0.00	23.20	23.20	100
5496	SU-48 MUESTRA 5	7.33	0.77	0.10	0.78	16.7	85	19	38	43	Ar.	11.68	8.94	2.43	0.14	0.17	0.00	11.68	11.68	100
5497	SU-48 MUESTRA 6	7.41	0.44	0.10	0.59	20.9	46	45	28	27	Fr.Ar.	8.80	6.20	2.40	0.10	0.10	0.00	8.80	8.80	100
5498	SU-48 MUESTRA 7	7.40	0.53	0.00	0.39	6.7	95	15	30	55	Ar.	10.56	7.81	2.48	0.13	0.13	0.00	10.56	10.56	100

A = Arena ; A.F. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@iamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL CANAZA MAMANI

Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA

Provincia : AZANGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO
Fecha : 16/07/2021

Referencia : H.R. 74619-067C-21

Bolt.: 4630

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dSm	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ar ⁺ + H ⁺			
5499	SU-49 MUESTRA 1	4.96	0.15	0.00	2.94	5.3	120	43	36	21	Fr.	10.24	4.91	1.47	0.33	0.10	0.20	7.01	6.81	87
5500	SU-49 MUESTRA 2	5.36	0.15	0.00	0.78	4.3	122	43	32	25	Fr.	8.00	4.32	1.20	0.23	0.09	0.10	5.94	5.84	73
5501	SU-49 MUESTRA 3	5.80	0.23	0.00	0.52	4.8	79	65	14	21	Fr.Ar.A.	8.80	4.99	2.33	0.22	0.17	0.10	7.80	7.70	88
5502	SU-49 MUESTRA 4	6.37	1.61	0.00	0.72	10.7	86	77	8	15	Fr.A.	10.24	7.06	2.42	0.28	0.08	0.00	9.84	9.84	96
5503	SU-50 MUESTRA 1	5.04	0.08	0.00	1.90	7.7	73	75	16	9	Fr.A.	5.76	3.35	0.80	0.23	0.07	0.10	4.55	4.45	77
5504	SU-50 MUESTRA 2	5.48	0.20	0.00	0.92	9.6	78	61	24	15	Fr.A.	6.72	4.28	0.85	0.13	0.09	0.10	5.45	5.35	80
5505	SU-50 MUESTRA 3	6.16	0.62	0.00	2.35	11.3	91	35	26	39	Fr.Ar.	21.12	15.49	3.25	0.19	0.18	0.00	19.12	19.12	91
5506	SU-50 MUESTRA 4	6.89	0.19	0.00	0.33	6.0	56	67	20	13	Fr.A.	8.00	6.03	1.52	0.13	0.12	0.00	7.80	7.80	97
5507	SU-50 MUESTRA 5	6.97	0.87	0.00	2.16	9.1	123	25	28	47	Ar.	17.12	14.27	2.22	0.16	0.28	0.00	16.92	16.92	99
5508	SU-50 MUESTRA 6	6.84	0.86	0.00	1.18	32.4	101	19	34	47	Ar.	16.80	13.92	2.38	0.16	0.23	0.00	16.70	16.70	99

A = Arena ; A.F. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@iamolina.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DANIEL GANAZA MAMANI

Departamento : PUNO
Distrito : J.D. CHOQUEHUANCA

Provincia : AZÁNGARO
Predio : MICROCUENCA
PACRAMAYO
Fecha : 16/07/2021

Referencia : H.R. 74619-067C-21

Bolt.: 4630

Número de Muestra	Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ar ⁺ + H ⁺			
5509	SU-S1 MUESTRA 1	5.04	0.12	0.00	2.94	5.9	110	53	32	15	Fr.A.	9.12	5.66	1.27	0.34	0.08	0.10	7.45	7.35	81
5510	SU-S1 MUESTRA 2	5.28	0.05	0.00	1.31	4.4	76	49	32	19	Fr.	8.80	5.89	1.07	0.21	0.09	0.10	7.35	7.25	82
5511	SU-S1 MUESTRA 3	5.80	0.36	0.00	2.03	6.9	89	31	32	37	Fr.Ar.	12.80	9.20	1.73	0.21	0.11	0.05	11.31	11.26	88
5512	SU-S1 MUESTRA 4	7.33	0.21	0.10	0.59	10.5	59	43	40	17	Fr.	8.96	7.39	1.30	0.16	0.10	0.00	8.96	8.98	100
5513	SU-S1 MUESTRA 5	7.53	0.53	0.19	0.72	11.6	90	43	30	27	Fr.Ar.	9.60	8.09	1.27	0.15	0.10	0.00	9.60	9.60	100
5514	SU-S1 MUESTRA 6	7.33	1.41	0.19	0.98	16.2	112	23	40	37	Fr.Ar.	16.32	14.07	1.90	0.28	0.07	0.00	16.32	16.32	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L. = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

MÉTODOS SEGUIDOS EN EL ANALISIS DE SUELOS

- Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
- Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
- PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 o en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
- Calcáreo total (CaCO₃): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
- Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono Orgánico con dicromato de potasio. %M.O. = %C x 1.724.
- Nitrogeno total: método del micro-Kjeldahl.
- Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO₃ 0.05M, pH 8.5
- Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH₃ - COONH₄)N, pH 7.0
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH₃ - COOCH₂)N; pH 7.0
- Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ cambiables: reemplazamiento con acetato de amonio (CH₃ - COONH₄)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.
- Al³⁺ + H⁺: método de Yuan. Extracción con KCl. N
- Iones solubles:
 - Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
 - Cl, Co₃, HCO₃, NO₃ solubles: volumetría y colorimetría, SO₄ turbidimetría con cloruro de Bario.
 - Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
 - Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

Equivalencias:
1 ppm = 1 mg/kilogramo
1 milimho (mmho/cm) = 1 decSiemens/metro
1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+) / kg
Sales solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes
CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

TABLA DE INTERPRETACION

Salinidad		Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Catiónicas		
Clasificación del Suelo	CE(es)	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2	*bajo	<2.0	<7.0	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 9
*ligeramente salino	2 - 4	*medio	2 - 4	7.0 - 14.0	*delc. Mg	>0.5	
*moderadamente salino	4 - 8	*alto	>4.0	>14.0	*delc. K	>0.2	
*fuertemente salino	>8				*delc. Mg		>10

Reacción o pH		CLASES TEXTURALES		Distribución de Cationes %	
Clasificación del Suelo	pH	A = arena	Fr.Ar.A = franco arcillo arenoso	Ca ²⁺	
*fuertemente ácido	<5.5	A.Fr. = arena franca	Fr.Ar = franco arcilloso	=	60 - 75
*moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Fr.A. = franco arenoso	Fr.Ar.L = franco arcilloso limoso	mg ²⁺	= 15 - 20
*ligeramente ácido	6.1 - 6.5	Fr. = franco	Ar.A = arcilloso arenoso	K ⁺	= 3 - 7
*neutro	6.6 - 7.0	Fr.L. = franco limoso	Ar.L. = arcilloso limoso	Na ⁺	= <15
*ligeramente alcalino	7.1 - 7.8	L = limoso	Ar. = arcilloso		
*moderadamente alcalino	7.9 - 8.4				
*fuertemente alcalino	>8.5				

Anexo 6. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo DANIEL CANAZA MAHANI
identificado con DNI 01200499 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ MODELAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RESERVAS
DE CARBONO ORGANICO DEL SUELO EN EL ALTIPLANO
PUNO-MICROCUECNA PACRAMAYO ”

Es un tema original.

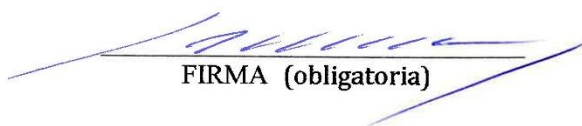
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de OCTUBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella

Anexo 7. Autorización para el depósito repositorio institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo DAMIEL CANAZA MAMANI
identificado con DNI 01200999 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE.
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ MODELAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RESERVAS
DE CARBONO ORGANICO DEL SUELO EN EL ALTIPLANO
PUNO- MICROCUENCA PACRAHAYO ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de OCTUBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella