

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**Impacto del cambio climático sobre el carbono orgánico del suelo en
la microcuenca Cojup – Áncash, entre el periodo 2021-2099**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor: Br. Jara Tarazona, Edison Edu

Asesor: Dr. Cruz Monzón, José Alfredo

Trujillo - Perú

2023

JURADO DICTAMINADOR

Dr. Aguilar Rojas, Percy Danilo

PRESIDENTE

Ms. Esquerre Pereyra, Paul Henry

SECRETARIO

Ms. Díaz Díaz, Natalia del Pilar

MIEMBRO

Dr. Cruz Monzón, José Alfredo

ASESOR

DEDICATORIA

Esto va para mis papás Linda y Ber, gracias por todo el sacrificio, los consejos y el apoyo incondicional en todo momento. A mi hermano Junior, que, aunque indirectamente y sin saberlo, me ayudó en su momento conversando y compartiendo momentos de intenso debate. A mi hermana Yazira, que su sola presencia fue una gran motivación. Y a mi compañera de vida Konny, que, con todo su apoyo, paciencia, amor, energía y motivación, me ayudó a culminar con esta etapa en mi vida académica.

Atte.

Edu

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las personas que formaron parte de este camino, primero al equipo del INAIGEM y al programa de tesis de la DIGC al que pude acceder, gracias a su financiamiento económico se pudo realizar esta investigación, al Dr. Christian Yarlequé, co-asesor en el desarrollo de este trabajo, por sus consejos, comprensión y su tiempo incondicional para ayudar a resolver mis dudas, al equipo de la SDIA-DIGC, Percy, Stephany, Robert, David, Susan, Jessy, Ceci, Ulrrich, Walter; a la Dra. Beatriz Fuentealba y su equipo de la DIEM, Sandra, Pedro, Helder, Herbert, Melisa que a pesar de su agenda apretada pudieron ayudarme con sus comentarios; al ing. Juan Carlos y su equipo de la SDRAG, Harrison, Gina, Adriana que muy amablemente me brindaron su apoyo y compartieron información valiosa.

A la Dra. Carla Gavilan y al Dr. Adolfo Posadas por su tiempo para escuchar mis presentaciones y aportar en la mejora de la investigación.

Al Parque Nacional Huascarán – SERNANP por los permisos para trabajar en el área de estudio.

Y a mi gran amigo, que sin pedir nada a cambio me apoyó en diferentes ocasiones, Pedrito muchas gracias por todo.

Atte.

Edu

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
JURADO DICTAMINADOR	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Realidad Problemática.....	1
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Antecedentes Internacionales	3
1.2.2. Antecedentes Regionales.....	5
1.3. Marco Teórico	7
1.3.1. Materia Orgánica del Suelo (MOS) y Carbono Orgánico del Suelo (COS).....	7
1.3.2. Estabilización de la Materia Orgánica del Suelo.....	10
1.3.3. Factores que Controlan la Estabilización de la Materia Orgánica del Suelo.....	11

	Pág.
1.3.4. Ecosistemas de Montaña y Carbono Orgánico del Suelo.....	13
1.3.5. Cambio Climático.....	14
1.4. Problema.....	15
1.5. Hipótesis.....	15
1.6. Objetivos	16
1.6.1. Objetivo General.....	16
1.6.2. Objetivos Específicos	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.1. Enfoque y Nivel de la Investigación	17
2.1.1. Enfoque de la Investigación	17
2.1.2. Nivel de Investigación	17
2.2. Contexto de la Investigación	17
2.2.1. Localización y Tiempo	17
2.2.2. Acceso a la Información	20
2.3. Diseño Metodológico	20
2.3.1. Diseño de la Investigación.....	20
2.3.2. Variables de Estudio.....	20
2.4. Procedimiento.....	21
2.4.1. Caracterización de la Zona de Estudio	21

	Pág.
2.4.2. Muestreo del Suelo	22
2.4.3. Análisis de Laboratorio	22
2.4.4. Modelamiento de la Distribución Espacial del COS	23
2.4.5. Recopilación de la Información de los Factores Climáticos	23
2.4.6. Corrección de las Variables Climáticas.....	24
2.4.7. Interpolación de las Variables Climáticas	24
2.4.8. Detección de Valores Atípicos	24
2.4.9. Modelo Empírico que Relaciona los Factores Climáticos y las Reservas de COS	24
2.4.10. Validación del Modelo Empírico.....	25
2.4.11. Proyección de la Dinámica del COS.....	25
2.4.12. Determinar el Impacto del Cambio Climático sobre las Reservas de COS	26
3. RESULTADOS	27
3.1. Contenido de Carbono Orgánico y Características del Suelo	27
3.1.1. Características de la Zona de Estudio.....	27
3.1.2. Carbono Orgánico y Características del Suelo.....	29
3.1.3. Modelamiento de la Distribución Espacial del COS en la Microcuenca Cojup..	34
3.2. Modelo Empírico entre los Factores Climáticos y las Reservas de COS.....	35
3.2.1. Información de los Factores Climáticos	35

	Pág.
3.2.2. Propuesta del Modelo Empírico	41
3.2.3. Validación del Modelo Empírico	50
3.3. Proyección de la Probable Dinámica del COS y Determinación del Impacto del Cambio Climático Sobre las Reservas de COS.....	53
4. DISCUSIÓN	58
5. CONCLUSIONES	64
6. RECOMENDACIONES	65
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Cambio de temperatura observado con respecto a los años 1850-2018 (IPCC, 2019).	1
<i>Figura 2.</i> Tendencias históricas de precipitación anual para las estaciones meteorológicas de Ayabaca, Recuay y Lampa, ubicadas en los departamentos de Piura, Áncash y Puno respectivamente (SENAMHI, 2020).	2
<i>Figura 3.</i> Ubicación de la microcuenca Cojup y su distancia respecto a la ciudad de Huaraz. Figura tomada de Google Earth.....	18
<i>Figura 4.</i> Delimitación de la microcuenca Cojup y distribución de los puntos de muestreo....	19
<i>Figura 5.</i> Valores promedio para las variables temperatura y precipitación según la estación meteorológica ubicada en las inmediaciones de la laguna Palcacocha.	27
<i>Figura 6.</i> Valores promedio para las variables temperatura y precipitación según la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Huaraz.	28
<i>Figura 7.</i> Mapa geológico de la microcuenca Cojup.	29
<i>Figura 8.</i> Resultados del análisis de tipo de textura del suelo en las muestras recolectadas en la microcuenca Cojup.	31
<i>Figura 9.</i> Zona de muestreo (color amarillo) ubicada en la microcuenca Cojup (color rojo). Figura tomada de Google Earth.....	31
<i>Figura 10.</i> Distribución del COS por cada punto de muestreo, cada barra representa la suma del COS en todo el perfil del suelo muestreado.	32
<i>Figura 11.</i> Distribución de COS detallado según los puntos de muestreo. Cada punto muestreado presenta cuatro niveles de profundidad (10, 20, 30 y 40 cm).....	33

<i>Figura 12.</i> Distribución de COS por punto de muestreo y clasificado por el nivel de profundidad del suelo.....	34
<i>Figura 13.</i> Mapa interpolado del contenido de COS en la microcuenca Cojup.....	35
<i>Figura 14.</i> Variación de la altitud en la microcuenca Cojup según cada punto de muestreo. ..	36
<i>Figura 15.</i> Temperatura media entre el periodo 1981 al 2020, valores corregidos para la ciudad de Huaraz (Hersbach et al, 2019)	37
<i>Figura 16.</i> Precipitación anual entre el periodo 1981 al 2020, valores corregidos para la ciudad de Huaraz (Hersbach et al, 2019)	37
<i>Figura 17.</i> Temperatura media y precipitación anual entre el periodo 1981 al 2020, valores interpolados para cada punto de muestreo en la zona de estudio.	38
<i>Figura 18.</i> Mapa interpolado de la variable temperatura del aire, valor promedio para el periodo 1981-2020 en la microcuenca Cojup.	40
<i>Figura 19.</i> Mapa interpolado de la variable precipitación, valor promedio para el periodo 1981-2020 en la microcuenca Cojup.	41
<i>Figura 20.</i> Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y COS.	42
<i>Figura 21.</i> Correlación lineal de Pearson entre las variables precipitación y COS.	43
<i>Figura 22.</i> Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y precipitación.	44
<i>Figura 23.</i> Intervalos de confianza y predicción para las variables temperatura del aire y COS a un nivel de confianza de 95 %.....	45
<i>Figura 24.</i> Intervalos de confianza y predicción para las variables temperatura del aire y COS a un nivel de confianza de 90 %.....	45

Figura 25. Proceso de eliminación progresiva de los valores atípicos. Se analizaron los parámetros estadísticos R^2 ajustado, desviación estándar y suma de cuadrados total.....46

Figura 26. Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y COS despues de la exclusión de los valores atípicos.....48

Figura 27. Parámetros estadísticos para la regresión lineal entre la temperatura media y el COS. El valor de R^2 ajustado es de 0,482 con un valor de significancia $< 0,05$ y los coeficientes del modelo son -9,88 para la temperatura media y 98,14 para el intercepto.49

Figura 28 Comparación espacial entre la temperatura media (parte superior) y las reservas de COS (parte inferior).....50

Figura 29. Parámetros estadísticos para analizar la validación cruzada con diferentes valores para el factor “k”.....52

Figura 30. Proyecciones futuras de la temperatura del aire según dos escenarios fututos de cambio climático. Líneas negras corresponden al periodo histórico entre 1981 hasta 2020, y las líneas de color para el periodo futuro entre 2021 hasta 2099.53

Figura 31. Primer periodo futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de temperatura del aire (valores en el eje izquierdo) para cada punto de muestreo.....54

Figura 32. Primer periodo futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de COS (valores en el eje derecho) para cada punto de muestreo.55

Figura 33. Segundo periodo futuro 2061-2099. Proyecciones futuras de temperatura del aire (valores en el eje izquierdo) para cada punto de muestreo.....56

Figura 34. Segundo periodo futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de COS (valores en el eje derecho) para cada punto de muestreo.57

<i>Figura 35.</i> Ubicación de los puntos de muestreo en la zona de estudio (divididos en 7 sectores, 21 puntos de muestreo y 35 calicatas). Figura tomada de Google Earth.....	77
<i>Figura 36.</i> Ubicación de las parcelas y calicatas (zona central y en los márgenes del río). Figura tomada de Google Earth.	78
<i>Figura 37.</i> Diseño de parcela para muestreo de suelo. Adaptado de Rüginitz et al. (2009)	81
<i>Figura 38.</i> Características de algunos puntos de muestreo en la microcuenca Cojup.	89
<i>Figura 39.</i> Desarrollo del muestreo de suelos en la zona de estudio – parte 1 (en la izquierda se observa la calicata y en la derecha el pesaje de las muestras).....	90
<i>Figura 40.</i> Desarrollo del muestreo de suelos en la zona de estudio – parte 2 (ubicaciones de las calicatas en la zona de estudio, imagen izquierda ubicada en la parte media, derecha arriba en la parte alta, derecha abajo en la parte baja).....	90
<i>Figura 41.</i> Pesado de muestras y trasvase a bolsas de papel para el secado en la estufa.	91
<i>Figura 42.</i> Secado de muestras en la estufa (izquierda) y muestra sin contenido de humedad (derecha).	91
<i>Figura 43.</i> Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 1.	95
<i>Figura 44.</i> Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 2.	96
<i>Figura 45.</i> Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 3.	97
<i>Figura 46.</i> Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 4.	98

Pág.

Figura 47. Informe del laboratorio con respecto a los resultados de la textura del suelo en la microcuenca Cojup.	99
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Ubicación de los puntos de muestreo de suelo en la microcuenca Cojup</i>	21
Tabla 2 <i>Características del suelo y contenido de COS</i>	30
Tabla 3 <i>Información de los factores climáticos para cada punto de muestreo</i>	39
Tabla 4 <i>Información de los puntos de muestreo</i>	79
Tabla 5 <i>Herramientas para la medición de carbono orgánico del suelo</i>	84
Tabla 6 <i>Resultados de las reservas de COS en la microcuenca Cojup</i>	92
Tabla 7 <i>Información de las estaciones meteorológicas</i>	94

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

CMIP6	Sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados.
CPTEC	Centro de Previsión Meteorológica y Estudios Climáticos.
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
INPE	Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil.
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
RCP4,5	Trayectoria de concentración representativa para un nivel de forzamiento radiativo de 4,5 W m ⁻² .
RCP8,5	Trayectoria de concentración representativa para un nivel de forzamiento radiativo de 8,5 W m ⁻² .
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SSP2-4,5	Trayectoria socioeconómica compartida número 2, con un nivel de forzamiento radiativo de 4,5 W m ⁻² .
SSP5-8,5	Trayectoria socioeconómica compartida número 5, con un nivel de forzamiento radiativo de 8,5 W m ⁻² .
UN	Organización de las Naciones Unidas.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar el impacto del cambio climático sobre las reservas de Carbono Orgánico del Suelo (COS), según los escenarios futuros de cambio climático RCP4,5 y RCP8,5 entre el periodo del 2021-2099, en un ecosistema de montaña al centro norte del Perú. Para ello se designó una zona de estudio con un rango altitudinal entre 3800 a 4500 m s.n.m. perteneciente a la cordillera Blanca, se recopilieron 252 muestras de suelo a cuatro niveles de profundidad (0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm). Asimismo, se recopiló información climática histórica y futura, realizado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, de acuerdo a los periodos 1981-2020 y 2021-2099, para las variables temperatura del aire y precipitación. Se obtuvieron resultados de COS entre 2,3 a 54,3 t ha⁻¹ con un valor medio de 28,8 t ha⁻¹, con valores más altos en las zonas de mayor altitud y viceversa. Asimismo, se determinó un modelo empírico entre la temperatura del aire y el COS, con un valor para el coeficiente de determinación ajustado de 0,482 y un p-value < 0,05. El método para determinar el modelo empírico fue el método de ajuste de modelos lineales. Se concluyó que la temperatura del aire explica un 48,2 % de la variabilidad del COS en la microcuenca Cojup, a un nivel de confianza del 95 %. Asimismo, que las reservas futuras de COS tienen una tendencia de grandes disminuciones hacia el 2099, determinándose un impacto negativo del cambio climático sobre las reservas de COS para ambos escenarios futuros.

Palabras Clave: Cambio climático, carbono orgánico del suelo, modelo empírico, ecosistemas de montaña, Áncash.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the potential impact of climate change on SOC reserves, according to the future climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5 between the period 2021-2099, in a mountain ecosystem in the north center of the Peru. For this, a study area with an altitudinal range between 3800 to 4500 m a.s.l. was designated. belonging to the Cordillera Blanca, 252 soil samples were collected at four depth levels (0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm). Likewise, historical and future climate information was collected, carried out by the European Center for Medium-Term Weather Forecasts, according to the periods 1981-2020 and 2021-2099, for the variables air temperature and precipitation. SOC results were obtained between 2.3 to 54.3 t ha⁻¹ with a mean value of 28.8 t ha⁻¹, with higher values in the higher altitude areas and vice versa. Likewise, an empirical model between air temperature and SOC was determined, with a value for the adjusted coefficient of determination of 0.482 and a p-value < 0.05. The method to determine the empirical model was the method of fitting linear models. It was concluded that the air temperature explains 48.2 % of the SOC variability in the Cojup micro-basin, at a confidence level of 95 %. Also, that future SOC reserves have a trend of large decreases towards 2099, determining a negative impact of climate change on SOC reserves for both future scenarios.

Keywords: Climate change, soil organic carbon, empirical model, mountain ecosystems, Ancash.

INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

Desde hace algunos años el cambio climático ha venido haciéndose presente de diversas formas, ya sea con la ocurrencia de eventos naturales extremos o atípicos, o con la modificación de factores climáticos en los ecosistemas. Según el reporte del IPCC (2019), desde los años 1850 la temperatura media del aire en la superficie ha aumentado en 1,53 °C (línea de color gris), casi el doble en comparación con el aumento de 0,87 °C correspondiente para la temperatura media global en superficies como tierra y océano (línea de color negro), tal como se muestra en la Figura 1.

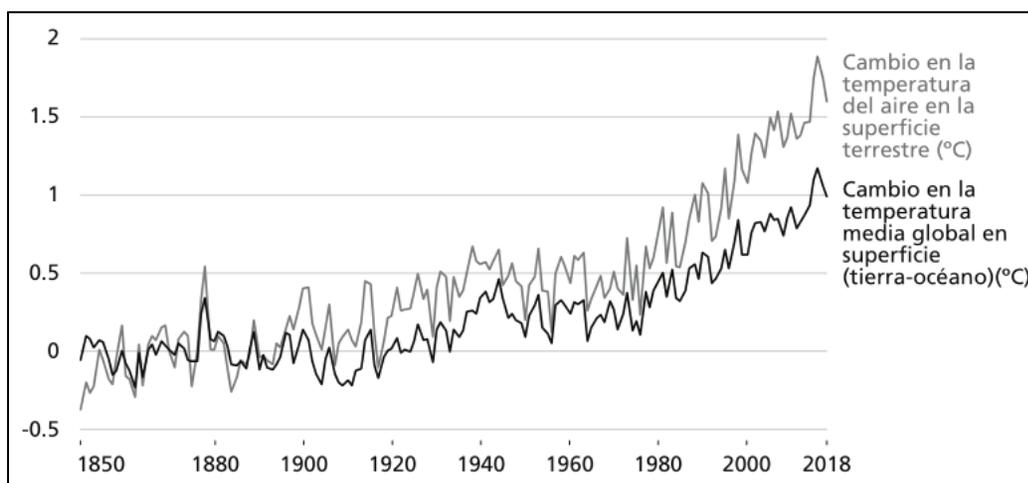


Figura 1. Cambio de temperatura observado con respecto a los años 1850-2018 (IPCC, 2019).

Este incremento de temperatura ha provocado modificaciones en la frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos dependientes de la energía térmica, fenómenos como las sequías, que han aumentado su frecuencia e intensidad en algunas regiones del planeta (incluidas varias partes de América del Sur), así como las precipitaciones, que han aumentado su intensidad a escala mundial. Y considerando la modificación de otros fenómenos como el incremento del nivel del mar, la erosión costera y el deshielo del permafrost, en conjunto, tienen la capacidad de agudizar los procesos de degradación de la tierra (IPCC, 2019).

Asimismo, a nivel regional y local la precipitación ha registrado tendencias de incremento, con valores entre los 24,90 mm década⁻¹ hasta los 61,79 mm década⁻¹. En diferentes partes

del Perú (zona norte, centro y sur) se tienen registros históricos de la variable meteorológica acumulado de precipitación, donde las tendencias muestran un incremento histórico en esta variable como se puede observar en la Figura 2 (SENAMHI, 2020).

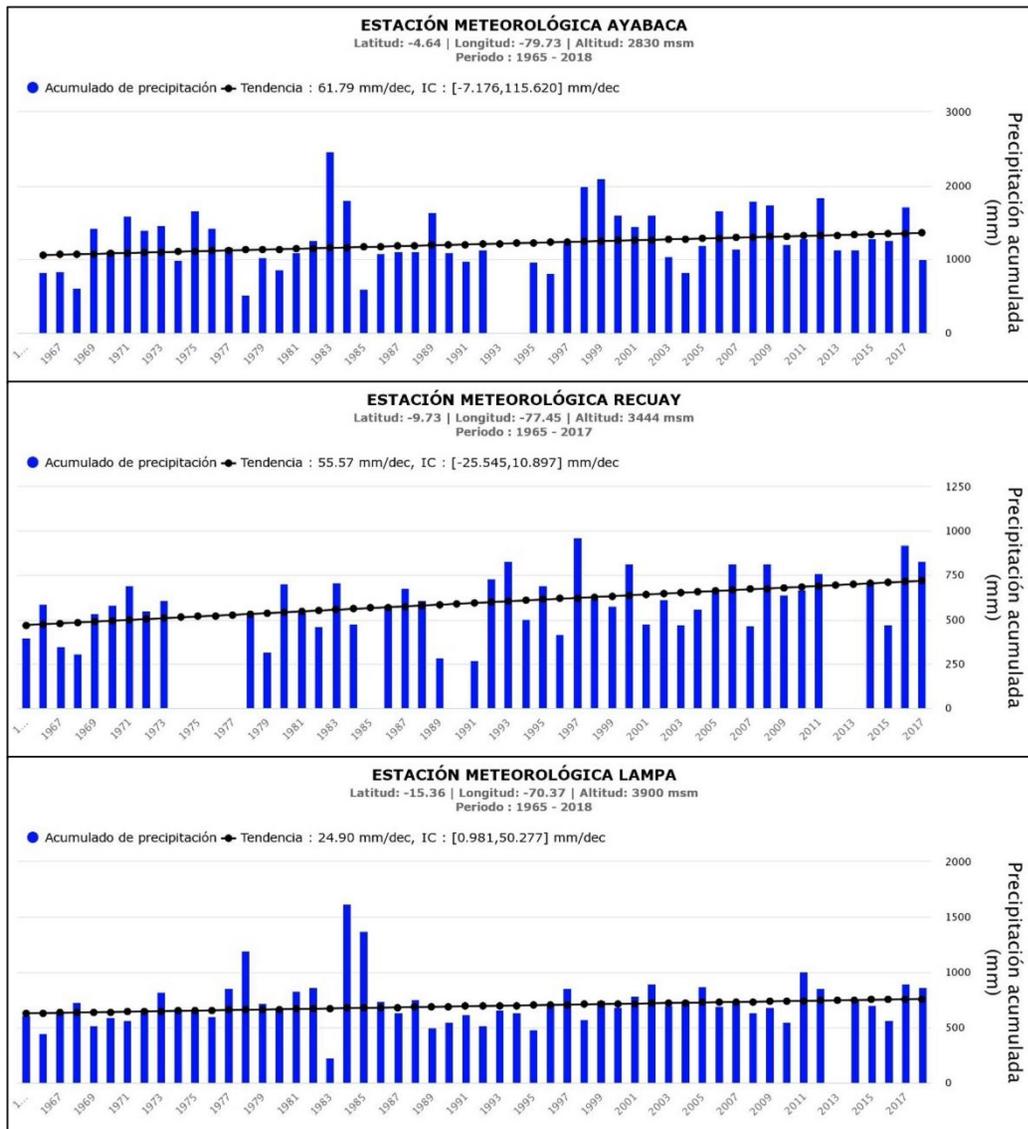


Figura 2. Tendencias históricas de precipitación anual para las estaciones meteorológicas de Ayabaca, Recuay y Lampa, ubicadas en los departamentos de Piura, Áncash y Puno respectivamente (SENAMHI, 2020).

Por otro lado, los flujos globales de carbono nos ayudan a entender si los ecosistemas terrestres en todo el planeta fijan más dióxido de carbono atmosférico (CO₂) en comparación con lo que se emite hacia la atmósfera mediante diversos procesos. Según Le Quéré et al. (2016), entre 2006 y 2015, las emisiones de carbono fueron dos veces

mayor en comparación con la suma de las reservas de carbono oceánico y terrestre, con un 90 % procedentes de la industria y combustibles fósiles. Además, se calcula que desde los últimos 10 000 años se ha añadido a la atmósfera alrededor de 220 Pg (petagramos) de carbono (C), equivalente a una tasa de 4,4 Pg C año⁻¹ aproximadamente, pasando así de una fluctuación de 180-290 ppm antes de la era de la industrialización, a más de 397 ppm de CO₂ en la atmósfera en el año 2014 (Baldocchi et al., 2016).

En este contexto, el suelo se convierte en un gran protagonista con respecto al flujo de carbono, ya que, debido a las interacciones entre los diversos factores, ya sean climáticos, antropogénicos y demás, puede comportarse como un sumidero o como una fuente de carbono hacia la atmósfera (IPCC, 2014; FAO, 2017). Y en un contexto de cambio climático, donde los estudios mencionan que la temperatura media del aire se incrementará progresivamente, y con ello diversos factores se verán modificados, toma mayor relevancia entender cómo la variación de los factores climáticos influirá en el comportamiento del suelo con respecto al flujo de carbono.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes Internacionales

Wang et al. (2022) realizaron un modelado y mapeo de las reservas de COS bajo escenarios futuros de cambio climático en Australia, con el objetivo de predecir las existencias actuales y futuras del COS al sureste del país. Realizaron proyecciones de las reservas de COS para un futuro cercano (2050) y un futuro lejano (2090), de acuerdo a dos escenarios de rutas socioeconómicas compartidas denominados SSP2-4,5 y SSP5-8,5, acorde a la sexta fase del proyecto de Inter comparación de modelos acoplados (CMIP6 por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron una disminución entre el 7,6 y 12,9 % para el escenario futuro SSP2-4,5 y entre un 9,1 y 20,9 % para SSP5-8,5, con variaciones espaciales a lo largo del país. Concluyendo en que sus hallazgos respaldan la toma de decisiones en la gestión de la tierra y las estrategias para mitigar el cambio climático.

Jia et al. (2021) realizaron una simulación de las reservas de COS en tierras de cultivo al norte de China, teniendo en cuenta diferentes escenarios futuros de cambio climático, con la finalidad de cuantificar la influencia combinada de la temperatura y la precipitación sobre el COS. Los resultados mostraron que ante un aumento de temperatura de 2 °C y una disminución del 20 % en la precipitación se presenta una acumulación de 39,10 t de carbono, entre el periodo del 2010 al 2039. Si se mantiene el aumento de temperatura de 2 °C y un incremento de la precipitación en un 20 % se presenta un menor secuestro de carbono de 37,39 t. Además, se analizó un aumento de temperatura de 4 °C con disminución y aumento de la precipitación, presentando menores valores en el secuestro de carbono. El estudio concluyó en que el calentamiento futuro y los cambios en la precipitación pueden ocasionar una disminución en el secuestro de COS, al mismo tiempo estos ecosistemas continuarán su rol como sumidero de CO₂ atmosférico a largo plazo.

Li et al. (2021) estudiaron la respuesta del COS al cambio climático en ecosistemas de montaña, con el objetivo de investigar los impactos de las variaciones de la precipitación y el calentamiento en la dinámica del COS, tanto en la parte superficial del suelo como a mayor profundidad. Los resultados revelaron una inconsistencia temporal entre el COS de los 20 cm superiores (COS20) del suelo y la dinámica del COS a profundidades mayores (COS100), con una tendencia decreciente para el COS20. Asimismo, el COS100 puede ser más sensible al calentamiento debido al incremento en la actividad microbiana. Por el contrario, el COS20 presentó respuestas más intensas a la variación en la precipitación en comparación al COS100. De acuerdo a futuras proyecciones se concluye que el COS20 puede no cambiar considerablemente, debido a la compensación del ingreso de carbono. Por el contrario, el COS100 disminuiría significativamente debido al incremento en la descomposición del carbono presente.

Wiesmeier et al. (2019) realizó una investigación sobre el almacenamiento de COS teniendo en cuenta los impulsores e indicadores a varias escalas, con el fin de identificar las propiedades bióticas o abióticas que controlan el almacenamiento de COS a diferentes escalas espaciales, y que podrían ser de utilidad como indicadores para una cuantificación adecuada del COS. Los resultados mostraron a la fracción mineral como el indicador clave para determinar la estabilización del COS, y si se tiene en cuenta los factores climáticos la cuantificación del COS tiende a ser más exacta. El uso de la tierra, la gestión del suelo y las características de la vegetación son factores que también influyen en una adecuada cuantificación de las reservas de COS.

Doetterl et al. (2018) estudiaron los vínculos entre el calentamiento, el COS y la dinámica microbiana, teniendo en cuenta la meteorización mineral del suelo. Sus resultados muestran que la dinámica del COS está impulsada por la interacción entre la parte biótica a corto plazo y la meteorización mineral a largo plazo, mencionando que la mineralogía del suelo afecta la actividad microbiana ante un incremento de temperatura.

1.2.2. Antecedentes Regionales

Yang et al. (2020) estudiaron la distribución del tamaño de los agregados del suelo en una interacción entre la litología, el clima y la estabilidad del COS en los Andes Peruanos, con el objetivo de investigar los efectos de la precipitación y la litología sobre los agregados del suelo y la estabilidad del COS, evaluando si la oclusión de la materia orgánica controla la estabilización del COS. Las reservas de COS oscilaron entre 153 ± 27 y 405 ± 42 Mg ha⁻¹, con valores más altos en suelos húmedos con presencia de material calizo. La estabilidad del COS disminuyó con la precipitación en los suelos con presencia de caliza. Se concluyó que la adsorción de la materia orgánica en superficies minerales es el principal mecanismo de estabilización de la misma, y que controla las existencias y la estabilidad del COS.

Yang (2020), en su estudio sobre los factores que controlan la distribución del COS, cuantificó las existencias de COS en zonas de pastizales de los andes peruanos, y determinó que lo encontrado es mayor en comparación con el nivel promedio mundial, pero menor en comparación con ecosistemas de los andes ecuatorianos. Asimismo, concluye que la litología es el factor clave que controla la estabilidad del COS, ésta disminuye con la precipitación en los suelos con presencia de materiales calizos.

Solano et al. (2018) realizó un estudio sobre cómo el gradiente altitudinal afecta las reservas de carbono del suelo en un ecosistema de matorral seco en Ecuador, obteniendo resultados que muestran que las reservas de COS disminuyen con la profundidad en ecosistemas subtropicales, esto podría responder a factores climáticos de precipitación y humedad ambiental, así como también a la presencia de organismos que fijan carbono en las capas superiores del suelo. Del mismo modo, los restos vegetales que se incorporan en la superficie del suelo y la presencia del sistema radicular de la vegetación influye de manera considerable en la presencia de COS en las primeras capas del suelo. En el mismo estudio se cuantificó las reservas de COS a lo largo de un gradiente altitudinal entre los 1200 y 1800 m s.n.m., encontrando diferencias significativas y con valores más altos para la zona de mayor altitud. Asimismo, en este gradiente se presentó un aumento de la precipitación y una disminución de la temperatura cuando se incrementa la altitud. En paralelo, mediante el índice de correlación de Spearman, se identificó una correlación fuerte entre las reservas de COS y las variables climáticas, presentando la temperatura una correlación negativa. Se puede mencionar que la descomposición de la materia orgánica en zonas más frías y con mayor precipitación sucede de manera más lenta y paulatina.

Según estudios de Yang et al. (2018), la profundidad de muestreo y la humedad del suelo determinan la variación del COS en sus resultados, cuando estas variables fueron controladas, la litología se convierte en el factor que controla las reservas de COS. Asimismo, la intensidad del pastoreo y la altitud también fueron

predictores significativos sobre las reservas de COS en los primeros 10 cm del suelo. Todo esto acorde a su investigación sobre las reservas de COS controladas por la litología y la profundidad del suelo, realizado en un pastizal de los Andes peruanos.

Rolando et al. (2017) realizaron una investigación sobre las reservas de COS en un ecosistema de pastizal altoandino de puna húmeda en Perú, cuyo objetivo fue el de evaluar el impacto que tienen los cambios en el uso de la tierra sobre el secuestro de COS. Se encontraron reservas de COS mayores en comparación a los valores promedio para las zonas de pastizales templados (entre 123 ± 4 y 136 ± 4 Mg ha⁻¹ en los primeros 30 cm del suelo).

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Materia Orgánica del Suelo (MOS) y Carbono Orgánico del Suelo (COS)

1.3.1.1. Definición e Importancia.

Se denomina MOS a aquellos compuestos orgánicos presentes en el suelo en diversas etapas de descomposición, ya sean tejidos animales o vegetales y organismos presentes en el suelo (FAO, 2017). La descomposición de la MOS permite la liberación de nutrientes, los cuales al estar disponibles para las plantas contribuyen al crecimiento de estas, mejorando su productividad y promoviendo la seguridad alimentaria (Van der Wal y de Boer, 2017). En función al tiempo necesario para la descomposición total de la MOS y el tiempo de permanencia influenciado por los productos presentes en el suelo (tiempo de rotación), se puede dividir en dos grupos: (1) reservas activas: renovación en pocos años, y (2) reservas pasivas: renovación en miles de años. (Gougoulias et al., 2014).

La MOS contiene una serie de elementos y compuestos, de entre los cuales se tiene un aproximado de 55 a 60 % de carbono orgánico, a este carbono se le conoce como COS, exceptuando las formas inorgánicas del carbono (FAO y GTIS, 2015). En el suelo se puede encontrar al carbono en dos diferentes

formas, carbono orgánico y carbono inorgánico. El carbono orgánico es el carbono que está presente en los residuos orgánicos de vegetales, animales y microorganismos en descomposición. Por otro lado, el carbono inorgánico es el carbono que se encuentra en diferentes compuestos como la calcita (CaCO_3), dolomita (MgCO_3), aragonita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] y siderita (FeCO_3) (Ayala et al., 2018).

De acuerdo a la estabilidad física y química del COS, se puede dividir en 3 grupos: (1) reserva rápida, es la reserva activa, a poco tiempo de haberse incorporado el carbono orgánico al suelo, con tiempos de rotación de 1-2 años, (2) reserva intermedia, el carbono orgánico ya ha sido procesado por microorganismos y está parcialmente estabilizado, ya sea por agregados o en superficies minerales, posee tiempos de rotación entre 10-100 años, y (3) reserva lenta, es una reserva altamente estable, donde se tienen periodos de rotación de 100 a más de 1000 años (FAO y GTIS, 2015; O'Rourke et al., 2015).

Los largos tiempos de rotación de los compuestos orgánicos son explicados por los siguientes factores: (1) las condiciones anaeróbicas, (2) la fijación de MOS en agregados del suelo, (3) la adsorción de la materia orgánica a superficies minerales en el suelo, (4) la separación física entre la MOS y los organismos descomponedores, y (5) las propiedades bioquímicas debido a la composición molecular de la MOS (FAO, 2017).

El COS forma parte del ciclo biogeoquímico del carbono en nuestro planeta, el cual es un proceso que consiste en el paso del carbono a través del suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera. Según FAO y GTIS (2015), la reserva de COS en el primer metro de suelo es de 1500 petagramos de carbono (Pg C), en la atmósfera es de 800 Pg C aproximadamente, y en la vegetación terrestre de 500 Pg C. Esto lo cataloga como un reservorio muy relevante de

COS, el cual se encuentra en constante dinamismo debido a la interacción entre las diferentes reservas mundiales (Kane, 2015).

Los principales gases presentes en la atmósfera que incluyen en su composición al carbono son el CO₂ y el CH₄, las plantas y algunos microorganismos utilizan al CO₂ como sustrato y lo transforman en material orgánico. El material orgánico muerto (residuos vegetales y tejidos animales) es asimilado por la fauna del suelo e incorporado a este, a esto se le conoce como “entrada de carbono en el suelo por microorganismos heterótrofos”. Resultado de esta transformación, se tiene una mezcla compleja de residuos vegetales, animales y productos de descomposición por parte de microorganismos, en diferentes etapas de descomposición, que pueden asociarse con minerales presentes en la matriz del suelo u ocluirse en agregados, permitiendo la estabilización del COS hasta por milenios (Von Lützow et al., 2006; Paul, 2014; Schmidt et al., 2011). El carbono retorna a la atmósfera en forma de CO₂, debido a la descomposición de la MOS realizada por los microorganismos descomponedores, en un proceso conocido como “respiración del suelo” (Yang, 2020, Jones et al, 2005).

La MOS es importante por diversas razones, entre las cuales tenemos que, brinda estabilización a la estructura del suelo, le confiere la capacidad de retención y liberación de nutrientes, capacidad de retención del agua, favoreciendo así la productividad agrícola y la resiliencia ambiental. (FAO, 2017; Yang et al., 2020)

El suelo es un gran reservorio de carbono, cuenta con aproximadamente 2500 gigatoneladas de carbono (Gt C), esto es mucho mayor en comparación con las reservas de carbono atmosférico y de la vegetación juntos. Dentro de esta reserva se tiene al COS con un aproximado de 1550 Gt C y al carbono inorgánico con 950 Gt C. Según Minasny et al. (2017), si las reservas de COS aumentan en un 0,4 % al año, es decir, 2,5 Gt C año⁻¹, se podría compensar en

un 30 % con respecto a las emisiones globales de los gases de efecto invernadero. De esta forma, mediante el secuestro de carbono se podría aliviar a largo plazo los efectos del calentamiento global (Lal, 2004).

Las reservas de COS dependen del equilibrio entre la cantidad de carbono que ingresa y la cantidad que sale, esta salida de carbono puede darse como producto de la respiración de los microorganismos descomponedores de carbono (mineralización microbiana), y en un menor porcentaje por la lixiviación del suelo como carbono orgánico disuelto (FAO, 2017).

1.3.2. Estabilización de la Materia Orgánica del Suelo

La estabilización de la MOS influye en gran medida en las reservas de COS. Diversas investigaciones (Schmidt et al., 2011, Lehmann y Kleber, 2015, Yang, 2020) mencionan un cambio de paradigma con respecto a este proceso, pasando de un modelo tradicional, que asume que la estabilidad de la MOS depende de la recalcitrancia química adquirida en el proceso de humificación (Stevenson, 1994), a un nuevo paradigma basado en la accesibilidad de la MOS a la descomposición por parte de los microorganismos descomponedores (Lehmann y Kleber, 2015).

El cambio de paradigma es originado debido a las críticas al modelo tradicional de humificación, y respaldado por algunas investigaciones que afirman que los compuestos que antes eran considerados recalcitrantes, es decir, que poseen una estructura química estable y resisten el ataque de los microorganismos o de otro tipo de degradación, por ejemplo, la lignina, puede descomponerse de forma rápida en el suelo. Asimismo, los compuestos que antes se asumía que se degradaban de forma rápida, por ejemplo, polisacáridos y proteínas, se ha demostrado que pueden persistir periodos prolongados ante la degradación por la acción de microorganismos (Lehmann y Kleber, 2015; Schmidt et al., 2011).

En el nuevo paradigma, la MOS al interactuar con la matriz del suelo, se adhiere a superficies minerales y iones metálicos, así como también se encuentra ocluida en agregados del suelo, siendo así, protegida contra la acción de los microorganismos (Yang, 2020). La MOS estabilizada por superficies minerales perdura a largo plazo, ya que, posee tasas de mineralización más baja con respecto a otros compuestos de MOS (Chenu et al., 2002). Asimismo, la estabilización de la MOS por oclusión en agregados confiere una inaccesibilidad física a los microorganismos, donde se tiene acceso restringido al contacto con la materia orgánica, así como al transporte de agua, oxígeno y enzimas para degradar macromoléculas insolubles presentes en la MOS (Van der Wal y de Boer, 2017), y en comparación con la MOS sin protección y con la MOS estabilizada por minerales, la MOS que forma parte de los agregados posee un tiempo de residencia intermedio (Schrumpf et al., 2013, Lützow et al., 2006).

Entender la estabilización de la MOS es de vital importancia para comprender los mecanismos que rigen sobre el secuestro y la estabilidad de las existencias de COS.

1.3.3. Factores que Controlan la Estabilización de la Materia Orgánica del Suelo

La estabilización y la renovación de la MOS está controlada principalmente por dos factores, la formación del suelo y los factores climáticos, dentro de estos últimos se consideran a la precipitación y a la temperatura del aire en la superficie terrestre, ya que actúan como impulsores primarios (Yang, 2020).

La formación del suelo se ve expresada en dos términos, la litología y la mineralogía del suelo; litología es el material parental, es decir, a la roca madre, el tipo de material sobre el cual se están formando los horizontes del suelo, este es un predictor relevante de la estabilización de la MOS según Angst et al., (2018); Hobley et al., (2015). Asimismo, la mineralogía del suelo se entiende como los tipos de elementos presentes en este, es decir, los minerales que están presentes en la matriz del suelo e interactúan con la MOS, influyendo en su

estabilización, ya sea por adherencia a su estructura o por oclusión en agregados (Yang, 2020; Schmidt et al., 2011).

El incremento de temperatura influye de dos maneras, por un lado, favorece el crecimiento de la vegetación, ya que se tiene una mayor temporada de crecimiento, con lo cual se incrementa la entrada de carbono hacia el suelo, este efecto disminuye con la profundidad del suelo (Wiesmeier et al., 2019). Por otro lado, el incremento de temperatura beneficia la proliferación de los microorganismos descomponedores, un proceso conocido como “respiración del suelo”, mediante el cual los microorganismos usan el carbono como sustrato y emiten hacia la atmósfera carbono en forma de CO₂ atmosférico y CH₄, este proceso se ve inhibido por la presencia de altos contenidos de arcilla en el suelo (Jones, 2005; Yang, 2020).

La precipitación regula la Productividad Primaria Neta (PPN), es decir, la diferencia entre la energía obtenida por la fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración de las plantas, cuando existe un superávit la biomasa de las plantas se incrementa, siempre y cuando las condiciones externas sean favorables, y con ello, la entrada de carbono hacia el suelo. Asimismo, la precipitación controla la disponibilidad de agua en el suelo, y con ello se restringe o se posibilita la descomposición de la MOS debido a las condiciones aeróbicas o anaeróbicas del medio (Chaplot et al., 2010; Wiesmeier et al., 2019). Además, dentro de los factores climáticos también son considerados los factores topográficos (el ángulo y el aspecto de la pendiente) como influyentes en la estabilización de la MOS, ya que, estos tienen influencia sobre la formación, humedad y erosión del suelo (Yang et al., 2020). Finalmente, los factores climáticos también pueden controlar los procesos de meteorización, con lo cual la mineralogía del suelo se verá afectada y por consecuencia, la estabilización de la MOS (Doetterl et al., 2015).

1.3.4. Ecosistemas de Montaña y Carbono Orgánico del Suelo

El COS se distribuye en forma heterogénea a lo largo de diversos ecosistemas, y depende de algunos factores como las condiciones climáticas, el tipo y uso del suelo, y la interacción entre los factores bióticos y abióticos presentes en el medio (FAO, 2017).

La ecorregión puna comprende a la zona de montañas localizadas por arriba de los 3800 msnm, donde se tienen diversas zonas de vida, como humedales, glaciares, cuerpos de agua y pastizales altoandinos, este último compuesto por pajonales, césped de puna y bofedales de alta montaña (Flores, 2019).

Los pastizales en el Perú ocupan una superficie aproximada de 15,4 millones de hectáreas (Flores, 2019), y brindan una variedad de servicios ecosistémicos, como la conservación de la biodiversidad, el secuestro de carbono, retención y disponibilidad de agua, reducción de la degradación de suelos, producción de forraje y mejora en la productividad del ganado, y la producción de alimentos (Rolando et al., 2017; Flores, 2019). Sin embargo, estos ecosistemas se ven perturbados por actividades antrópicas y condiciones naturales cambiantes en el medio, el cambio climático. Entre las actividades antrópicas que hacen presión sobre este ecosistema se puede mencionar la agricultura, la ganadería extensiva y el sobrepastoreo asociado, plantación de árboles y actividades mineras (Yang et al., 2020). Asimismo, los pastizales altoandinos son altamente vulnerables al cambio climático, la ocurrencia de eventos extremos como ausencia de lluvias o periodos largos de sequía, sumado a la proyección del aumento de la temperatura media global, podría afectar el crecimiento de la vegetación, la disponibilidad de agua para esas zonas y tierras bajas con clima seco, la degradación y la pérdida de nutrientes en el suelo, y como consecuencia se vería afectado la biodiversidad del ecosistema, la producción ganadera y la disponibilidad de alimentos, en especial sobre las poblaciones de menos recursos en estas zonas altoandinas (Flores, 2019).

1.3.5. Cambio Climático

Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) define al cambio climático como un cambio en el estado del clima (por ejemplo, el incremento de la temperatura o la variación en los patrones climáticos), dicho cambio puede ser identificado debido a la variabilidad que se produce en las condiciones meteorológicas y que perdura por un tiempo prolongado, por lo general décadas o un tiempo mayor. Este cambio puede ser impulsado por procesos naturales como las variaciones del ciclo solar o por forzamientos externos, como por ejemplo la actividad antrópica que altera la composición de la atmósfera y afecta la variabilidad natural del clima (IPCC, 2022).

De acuerdo a la organización de las Naciones Unidas (UN por sus siglas en inglés), el cambio climático hace referencia a todos los cambios en la temperatura y los patrones climáticos que se dan en una escala de tiempo a largo plazo. Estos cambios pueden ser de origen natural o debido a las actividades humanas, de hecho, desde la década de 1800 las actividades antrópicas han sido el principal motor del cambio climático (UN, 2023).

1.3.5.1. Impacto del Cambio Climático.

El impacto del cambio climático es definido como las consecuencias o efectos de las interacciones de diversas actividades relacionadas con el clima, ya sean de origen natural como los fenómenos meteorológicos extremos o de origen antrópico, que se dan lugar en los sistemas naturales. Estos resultados recaen sobre las vidas, las actividades de sustento, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, la economía, la sociedad y su cultura, los servicios sociales (incluidos los servicios ecosistémicos) y la infraestructura. Los impactos pueden clasificarse como adversos (negativos) o beneficiosos (positivos) (IPCC, 2022).

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) el cambio climático ya está sucediendo, en diversas partes del planeta se han registrado eventos poco usuales, cambios reales y observables de diferente naturaleza, a estos cambios se les denomina impactos del cambio climático. Por ejemplo: la temperatura promedio global se ha incrementado en aproximadamente 0.5 °C desde 1901 hasta 2016. Las temperaturas más cálidas intensifican las olas de calor, tanto en frecuencia como en duración, provocando potenciales riesgos para la salud. El incremento del nivel del mar afecta a la población y los ecosistemas costeros. Los cambios en la frecuencia y cantidad de precipitación pluvial afectan los suministros y la calidad del agua, la ocurrencia de sequías e inundaciones poco frecuentes, así como a la agricultura y la producción de energía eléctrica. La modificación de los ecosistemas influye en la geografía de especies animales y vegetales, pudiendo provocar la proliferación de algunas y la extinción de otras. El incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos puede ocasionar grandes pérdidas económicas y de vidas (EPA, 2023).

1.4. Problema

¿Cuál es el impacto del cambio climático sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup para el periodo comprendido entre el 2021-2099?

1.5. Hipótesis

El impacto del cambio climático sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo es negativo debido a que se espera una disminución de las reservas de carbono orgánico para el periodo comprendido entre el 2021-2099.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Determinar el impacto del cambio climático sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup, según dos escenarios futuros de cambio climático entre el periodo 2021-2099.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el contenido de carbono orgánico y las características del suelo en la microcuenca Cojup.
- Proponer un modelo empírico que relacione los factores climáticos y las reservas de COS en la microcuenca Cojup.
- Proyectar la probable dinámica del COS en la microcuenca Cojup, en base a dos escenarios futuros de cambio climático entre el periodo 2021-2099 y determinar el impacto del cambio climático sobre las reservas de COS.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Enfoque y Nivel de la Investigación

2.1.1. *Enfoque de la Investigación*

La presente investigación tiene un enfoque del tipo cuantitativo, debido a que se recopilaron datos con el fin de realizar análisis estadísticos y probar las hipótesis planteadas. Los datos medidos fueron de diferente naturaleza, del tipo climático, sobre ubicación, altitud, y sobre la cantidad de las reservas de COS.

2.1.2. *Nivel de Investigación*

El alcance de la investigación es del tipo correlacional, ya que el problema que se intenta responder es cómo el cambio climático, a través de la modificación de los factores climáticos, va a impactar sobre la distribución del carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup.

2.2. Contexto de la Investigación

2.2.1. *Localización y Tiempo*

2.2.1.1. **Ubicación y Delimitación del Área de Estudio**

La zona de estudio está localizada a aproximadamente 12 km al noreste de la ciudad de Huaraz, en el departamento de Áncash, comprende la extensión de la microcuenca Cojup (entre las coordenadas 230631 Este, 8950712,2 Norte y 238116,6 Este, 8959104,5 Norte), cuenta con un gradiente altitudinal entre los 3811 hasta 4556 m s.n.m., un área aproximada de 52 km² y pertenece a la subcuenca del río Quillcay, cuenca del Santa, ubicada en el departamento de Áncash (INAIGEM, 2016). Ver Figuras 3 y 4



Figura 3. Ubicación de la microcuenca Cojup y su distancia respecto a la ciudad de Huaraz. Figura tomada de Google Earth.

2.2.1.2. Tiempo de Estudio

Para el desarrollo de la investigación se recopiló información climática en dos periodos de tiempo, el primero de un registro histórico desde 1981 hasta 2020, y el segundo, datos climáticos futuros para el periodo 2021 al 2099. Asimismo, se recopilaron muestras de suelo para la determinación de carbono orgánico del suelo para el año 2022.

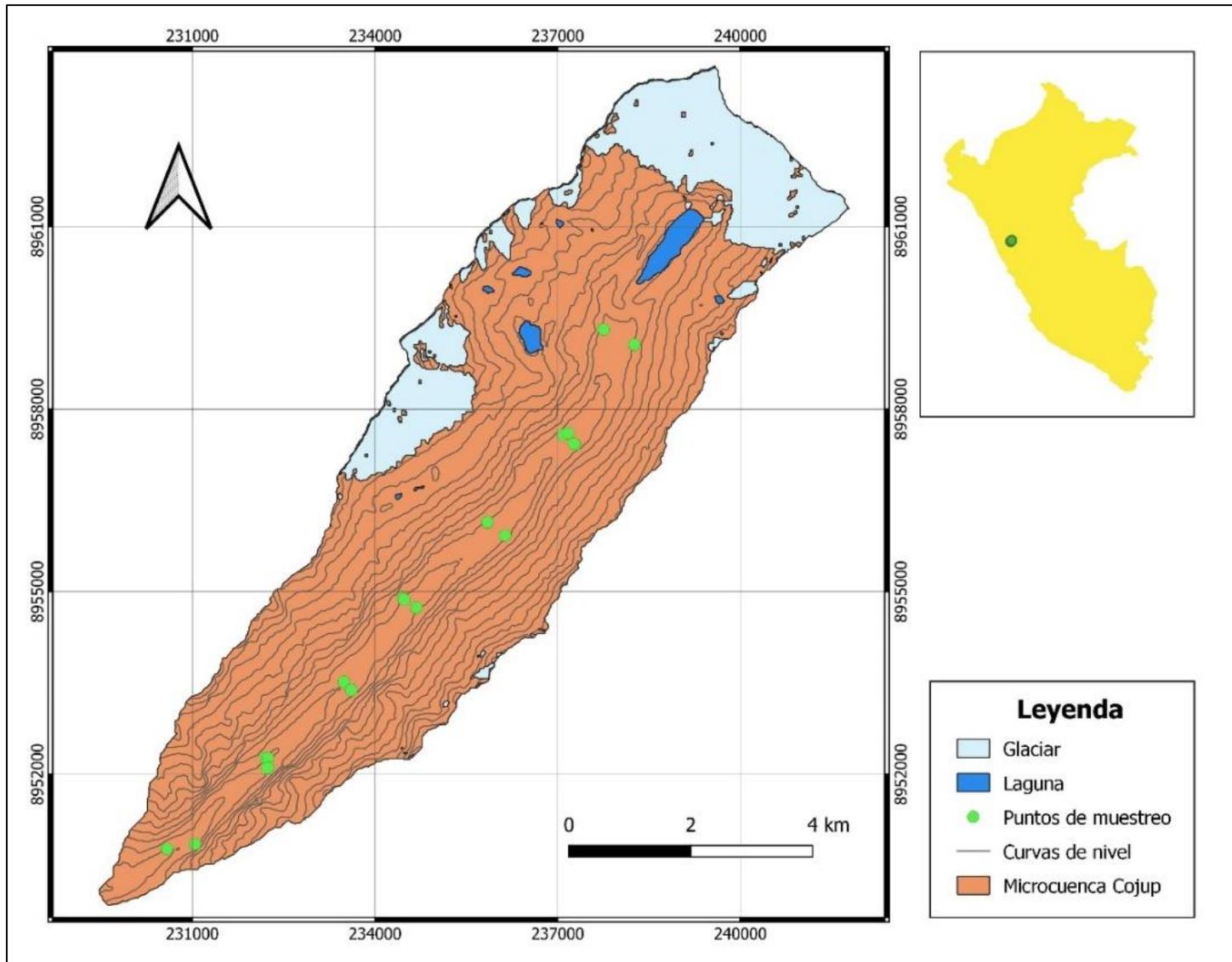


Figura 4. Delimitación de la microcuenca Cojup y distribución de los puntos de muestreo.

2.2.2. Acceso a la Información

La información necesaria para el desarrollo de la investigación se obtuvo de diferentes fuentes. El registro histórico de los datos climáticos de reanálisis se obtuvo en el portal del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés), el registro de los datos climáticos observados fue de dos estaciones meteorológicas ubicadas en la ciudad de Huaraz, una de ellas disponible en el portal del SENAMHI (estación UNASAM) y la otra administrada por el INAIGEM (estación ubicada en la parte alta de la microcuenca Cojup), asimismo, las mediciones de COS se realizaron en campo y posteriormente con un análisis en laboratorio, y finalmente, los datos climáticos futuros se obtuvieron del portal del Centro de Previsión Meteorológica y Estudios Climáticos (CPTEC) del Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil (INPE).

2.3. Diseño Metodológico

2.3.1. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es del tipo no experimental, ya que no se hace variar de forma intencional las variables independientes con el fin de analizar su efecto sobre la variable dependiente, por lo contrario, se observó el comportamiento de los factores climáticos en un periodo histórico y futuro, se tomó registro de estos datos, se midió la cantidad de reservas de COS presente y se buscó comprender la relación entre estos.

2.3.2. Variables de Estudio

2.3.2.1. Variable Independiente

- Cambio climático.

Definido con la variación de la temperatura del aire y precipitación.

2.3.2.2. Variable Dependiente

- Contenido de Carbono orgánico del suelo.

2.4. Procedimiento

2.4.1. Caracterización de la Zona de Estudio

Se registró la siguiente información con respecto a la microcuenca Cojup: ubicación geográfica, altitud, área de interés, cobertura vegetal, geología y geomorfología. Se realizó mediante trabajo en campo, investigaciones previas y revisión literaria, ver Tabla 1.

Tabla 1

Ubicación de los puntos de muestreo de suelo en la microcuenca Cojup

Ítem	Código punto de muestreo	Altitud (msnm)	Coordenadas UTM WGS84	
			Este	Norte
1	P1.NW.C1	3786	230581,5	8950776
2	P1.NW.C2	3786	230587,6	8950776
3	P3.SE.C4	3918	231045	8950856
4	P4.NW.C6	3998	232202	8952272
5	P4.NW.C7	3998	232241	8952266
6	P6.SE.C9	3949	232249	8952111
7	P6.SE.C10	3949	232228	8952102
8	P7.NW.C11	4102	233487	8953522
9	P7.NW.C12	4102	233487	8953522
10	P9.SE.C14	4099	233601	8953399
11	P9.SE.C15	4110	233613	8953384
12	P10.NW.C16	4187	234460	8954894
13	P10.NW.C17	4189	234477,6	8954870
14	P12.SE.C19	4169	234676,9	8954736
15	P12.SE.C20	4169	234679,9	8954742
16	P13.NW.C21	4279	235846	8956138
17	P13.NW.C22	4276	235849	8956146
18	P15.SE.C24	4256	236139	8955926
19	P15.SE.C25	4255	236139	8955926
20	P16.NW.C26	4328	237089	8957579
21	P16.NW.C27	4312	237166	8957605
22	P18.SE.C29	4321	237288	8957415

23	P18.SE.C30	4319	237264,9	8957434
24	P19.NW.C31	4434	237754	8959305
25	P19.NW.C32	4434	237758	8959307
26	P21.SE.C34	4507	238261	8959054
27	P21.SE.C35	4507	238264	8959060

Nota: Datos tomados en campo.

2.4.2. Muestreo del Suelo

Se realizó de acuerdo a la metodología propuesta en el documento denominado “Protocolo para la determinación de carbono orgánico total del suelo”, el cual se encuentra adjunto en el Anexo 01 y ha sido adaptado en base a las metodologías propuestas por MINAM (2014), Rüginitz et al. (2009) y Howard et al. (2018)

2.4.3. Análisis de Laboratorio

A) Carbono Orgánico y Tipo de Textura del Suelo

Los análisis de carbono orgánico y textura del suelo se realizaron de acuerdo a los métodos de Walkley y Black y de Bouyoucos, respectivamente (Rüginitz et al., 2009); ambos en las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

B) Densidad Aparente del Suelo

Se realizó de acuerdo a la metodología propuesta en el documento denominado “Protocolo para la determinación de carbono orgánico total del suelo”, el cual se encuentra adjunto en el Anexo 01 y ha sido adaptado en base a las metodologías propuestas por MINAM (2014), Rüginitz et al. (2009) y Howard et al. (2018). El lugar de trabajo fue en el laboratorio de la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) del INAIGEM, sede Huaraz.

2.4.4. Modelamiento de la Distribución Espacial del COS

Se realizó una matriz de datos con las siguientes variables: (1) Nombre del punto de muestreo, (2) coordenadas de la ubicación del punto de muestreo y (3) valores de COS en cada punto de muestreo.

Se importó al software QGis ® (versión 3.24) y se interpolaron los valores de COS según la extensión de la microcuenca Cojup, el método usado fue el método de interpolación geoestadístico IDW (Inverse Distance Weight).

2.4.5. Recopilación de la Información de los Factores Climáticos

Se recopiló información de los factores climáticos para las variables temperatura del aire, precipitación y altitud.

La información para las variables temperatura del aire y precipitación provienen de una base de datos con el registro histórico de 40 años (desde enero de 1981 hasta diciembre del 2020), considerados a un nivel de presión de 550 hPa para la temperatura del aire y a nivel superficial para la precipitación. La data se denomina “ERA5 - Land monthly averaged - ECMWF climate reanalysis”, es un conjunto de datos de reanálisis climático que combina datos de modelos matemáticos con observaciones a nivel mundial, y es realizado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés) (Muñoz, 2019).

Ambos registros fueron descargados del portal web del ECMWF y posteriormente se realizó el procesamiento de la data con el software R Studio. La resolución espacial para las variables temperatura del aire y precipitación es de 20 y 11 km aproximadamente.

Con respecto a la altitud, se registraron los valores en campo haciendo uso de un equipo GPS (GPS Montana 680 – GARMIN), de acuerdo a la ubicación geográfica respectiva para cada punto de muestreo del suelo.

2.4.6. Corrección de las Variables Climáticas

La corrección de las variables temperatura del aire y precipitación se realizó con ayuda de un registro de datos observados de 2 estaciones meteorológicas, una de ellas localizada en las inmediaciones de la Laguna Palcacocha (ubicada en la parte alta de la microcuenca Cojup) y la otra en la ciudad de Huaraz, ubicada en las instalaciones de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM). El método usado fue el método bias-correction (Copernicus Climate Change Service, 2022).

2.4.7. Interpolación de las Variables Climáticas

Los valores corregidos para las variables temperatura del aire y precipitación fueron interpolados para cada punto de muestreo. El método usado fue el método lapse rate (Qin et al, 2018).

2.4.8. Detección de Valores Atípicos

Los valores atípicos fueron detectados con el software Minitab, realizando gráficas de línea ajustada se analizaron intervalos de confianza y de predicción al 90 y 95 %.

2.4.9. Modelo Empírico que Relaciona los Factores Climáticos y las Reservas de COS

Se realizó una matriz de datos con las siguientes variables: (1) Nombre del punto de muestreo, (2) Reservas de COS, (3) Temperatura del aire y (4) Precipitación.

Para determinar la relación matemática entre las variables 2, 3 y 4 se utilizó el método de ajuste de modelos lineales, disponible con la función “lm” (Fitting Linear Models) del paquete “stats” incorporado en el software R Studio (versión 2022.07.1-554) (Chambers, 1992). Para medir el grado de covariación entre las variables se usaron los estadísticos como el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado). Finalmente, se estableció una prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 95 % y un nivel de significancia (p-value) de 0,05.

2.4.9.1. Formulación de las Hipótesis (H_0 y H_1) para la Elección del Modelo Empírico

A) Hipótesis Nula (H_0): Los factores climáticos como la temperatura del aire y la precipitación, de manera conjunta o independiente, no influyen sobre las reservas de carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup.

B) Hipótesis Alternativa (H_1): Los factores climáticos como la temperatura del aire y la precipitación, de manera conjunta o independiente, influyen sobre las reservas de carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup.

2.4.9.2. Criterio de la Elección de la Hipótesis

- Cuando el nivel de significancia (p-value) sea mayor al 0,05, se aprueba la hipótesis nula (H_0).
- Cuando el nivel de significancia (p-value) sea menor al 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

2.4.10. Validación del Modelo Empírico

Para validar el modelo se utilizó el método de validación denominado “*Repeated k-Fold-Cross-Validation*”, disponible en el paquete denominado “*caret*”, en el software R Studio (Kuhn, 2008).

2.4.11. Proyección de la Dinámica del COS

Se descargaron datos climáticos futuros para la variable temperatura del aire, entre el periodo 2021 al 2099 para dos escenarios futuros de cambio climático de intensidad de emisiones RCP4,5 y RCP8,5 (incremento del forzamiento radiativo en 4,5 y 8,5 $W m^{-2}$, respectivamente). Los datos climáticos futuros fueron generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma denominada PROJETA (Chou et al, 2014; Chou et al, 2014; Lyra et al, 2017).

Se realizó una matriz de datos con los valores futuros para la variable temperatura del aire. Los valores de temperatura fueron agrupados y promediados cada 40 años.

Con la información de los valores futuros de temperatura y el modelo empírico determinado en la sección 2.4.9, se determinó la proyección de los valores futuros de COS entre el periodo 2021 al 2099 para los escenarios futuros de cambio climático de intensidad de emisiones RCP4,5 y RCP8,5.

2.4.12. Determinar el Impacto del Cambio Climático sobre las Reservas de COS

Se realizaron gráficos estadísticos de tendencia para evidenciar el impacto del cambio climático sobre las reservas de COS entre el periodo de estudio. Se consideró como línea base los valores actuales de COS, y se determinó como impacto positivo cuando los valores de COS futuros fueron mayores en comparación a la línea base y, como impacto negativo cuando los valores de COS futuros fueron inferiores.

RESULTADOS

3.1. Contenido de Carbono Orgánico y Características del Suelo

3.1.1. Características de la Zona de Estudio

Teniendo en cuenta la meteorología de la zona de estudio, se cuenta con dos estaciones meteorológicas cercanas a ésta, de las cuales una se encuentra ubicada en las inmediaciones de la laguna Palcacocha (parte alta de la microcuenca Cojup) y la otra en la ciudad de Huaraz. La estación Palcacocha reportó los siguientes valores promedio para las variables temperatura máxima y mínima, 9,4 y 0,1 °C, respectivamente, y una precipitación anual de 993 mm año⁻¹ (ver Figura 5). De igual manera, la estación ubicada en la ciudad de Huaraz reportó los siguientes valores promedio (ver Figura 6): temperatura máxima de 23,6 °C, temperatura mínima de 4,0 °C y precipitación anual de 868 mm año⁻¹ (SENAMHI, 2020). La ciudad de Huaraz se caracteriza por tener un equilibrio entre periodos secos y húmedos (en promedio 7 meses de época lluviosa, que va desde octubre hasta abril) tal como se muestra en la Figura 6.

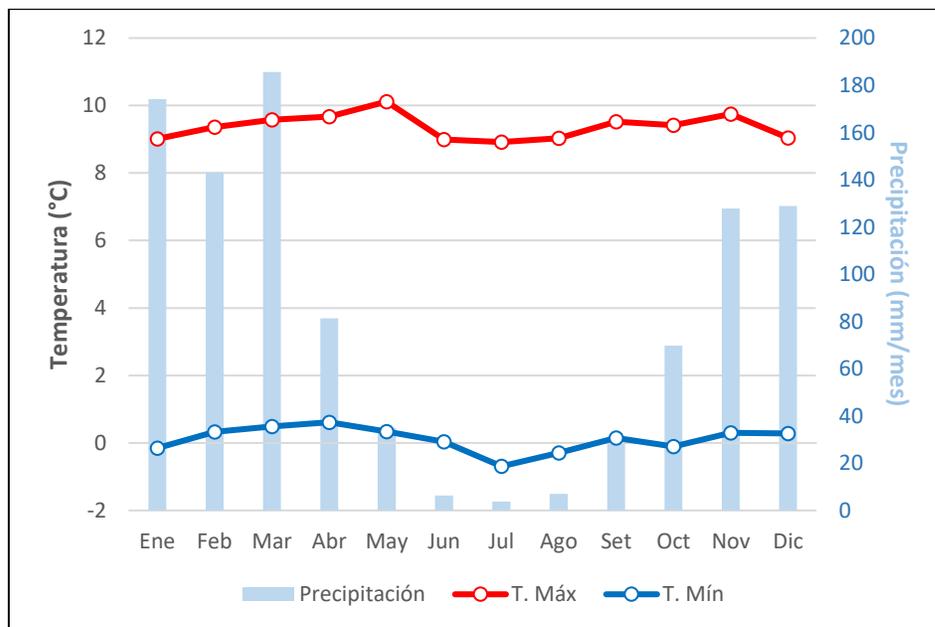


Figura 5. Valores promedio para las variables temperatura y precipitación según la estación meteorológica ubicada en las inmediaciones de la laguna Palcacocha.

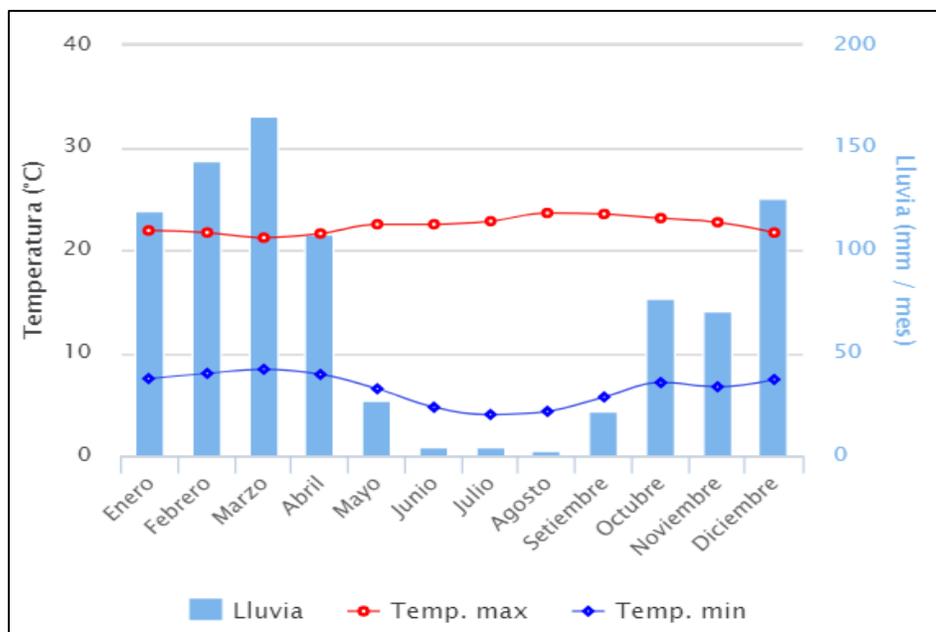


Figura 6. Valores promedio para las variables temperatura y precipitación según la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Huaraz.

Según la identificación y georreferenciación que se realizó en las áreas de investigación situadas en la microcuenca Cojup, por parte de INAIGEM (2016), la cobertura vegetal característica de la zona está representada por cuatro macro ecosistemas, entre ellos se tienen: (1) Bosques andinos, (2) Humedales, (3) Praderas nativas y (4) zonas peri glaciares.

La geología de la zona de estudio se caracteriza por ser de dos tipos, una donde predominan las gravas, arenas en matriz limo arenosas y materiales residuales no consolidados denominados depósitos fluvio-glaciares, y el otro tipo donde predominan materiales como granodiorita y tonalita, denominado batolito de la cordillera blanca, tal y como se presenta en la Figura 7 (INAIGEM, 2018).

Con respecto a la geomorfología de la zona de estudio se presenta un relieve montañoso característico a lo largo de toda la microcuenca, variando entre tres tipos, ladera alta en suelo, ladera media en suelo y fondo de valle glaciar (INAIGEM, 2018).

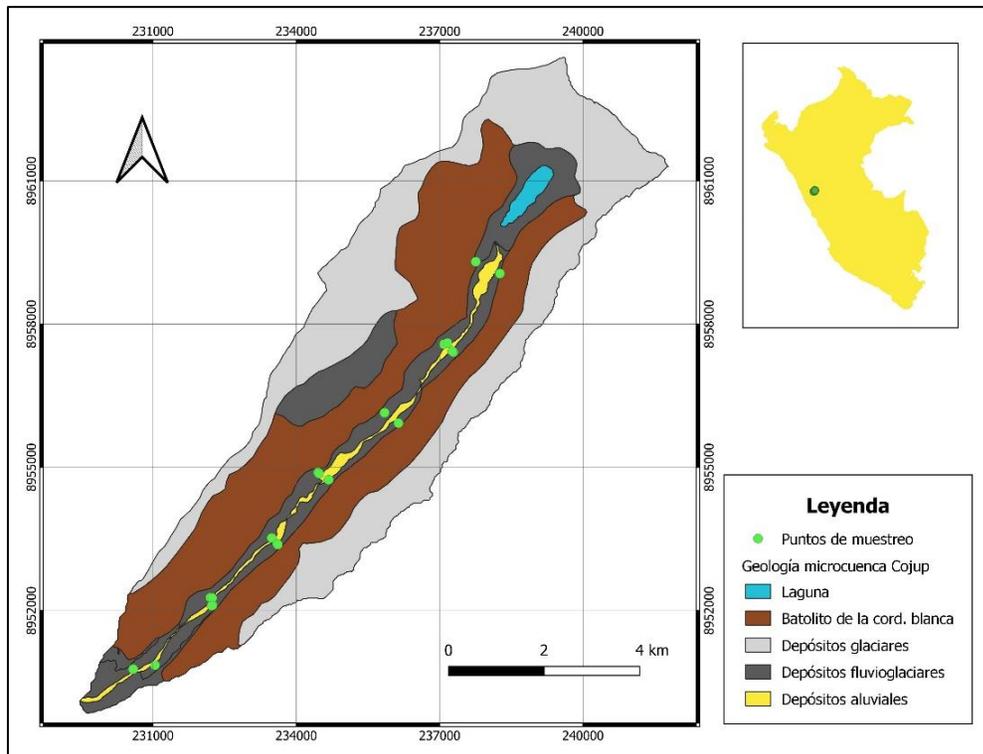


Figura 7. Mapa geológico de la microcuenca Cojup.

3.1.2. Carbono Orgánico y Características del Suelo.

Se estudiaron las características del suelo y el contenido de carbono orgánico del mismo, de esta manera poder entender el mecanismo de estabilización del COS e intentar explicar los resultados que se presentan a continuación.

En la tabla 2 se presentan los resultados de las características del suelo y las reservas de carbono orgánico, las características del suelo estudiadas fueron (1) textura del suelo, (2) cobertura del suelo, (3) geología y (4) geomorfología.

De acuerdo a las muestras de suelo extraídas y con los resultados del análisis del tipo de textura del suelo, se obtuvieron las siguientes texturas: (1) franco arenoso, (2) arena, (3) arena franca, (4) franco y (5) franco limoso. Teniendo como textura con mayor frecuencia a la del tipo franco arenoso, ver Figura 8.

Tabla 2*Características del suelo y contenido de COS*

Punto de muestreo	Textura del suelo	Cobertura del suelo	Geología	Geo morfología	Reserva de C (t ha⁻¹)
P1.NW.C1	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	53,51
P1.NW.C2	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	52,79
P3.SE.C4	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	13,79
P4.NW.C6	Arena franca	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	15,84
P4.NW.C7	Arena franca	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	13,20
P6.SE.C9	Arena	Pastizal	Qh-fg	Rm-lms 6	5,52
P6.SE.C10	Arena	Pastizal	Qh-fg	Rm-lms 6	21,34
P7.NW.C11	Franco	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	4,72
P7.NW.C12	Franco	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	5,95
P9.SE.C14	Franco limoso	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	20,52
P9.SE.C15	Franco limoso	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	2,27
P10.NW.C16	Arena	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	19,65
P10.NW.C17	Arena	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	2,57
P12.SE.C19	Arena franca	Matorral	Qh-fg	Rm-fvg 4	21,34
P12.SE.C20	Arena franca	Matorral	Qh-fg	Rm-fvg 4	21,51
P13.NW.C21	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	37,41
P13.NW.C22	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-las 8	44,33
P15.SE.C24	Franco arenoso	Pastizal	Qh-fg	Rm-lms 6	35,27
P15.SE.C25	Franco arenoso	Pastizal	Qh-fg	Rm-lms 6	43,27
P16.NW.C26	Franco arenoso	Pastizal	Qh-fg	Rm-las 8	49,74
P16.NW.C27	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	47,97
P18.SE.C29	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-lms 6	40,24
P18.SE.C30	Franco arenoso	Matorral	Qh-fg	Rm-fvg 4	45,69
P19.NW.C31	Franco arenoso	Matorral	N-gd/to	Rm-lms 6	45,28
P19.NW.C32	Franco arenoso	Matorral	N-gd/to	Rm-lms 6	54,28
P21.SE.C34	Arena franca	Pastizal	Qh-fg	Rm-las 8	31,21
P21.SE.C35	Arena franca	Pastizal	Qh-fg	Rm-las 8	27,89

Nota: Geología (Qh-fg: Depósitos Fluvio-glaciares - Gravas, arenas en matriz limo arenosas. Arenas y materiales residuales no consolidados; N-gd/to: Batolito de la cordillera Blanca, granodiorita, tonalita). Geomorfología (Rm-las 8: Relieve montañoso - Laderas alta en suelo; Rm-lms 6: Relieve montañoso - Laderas media en suelo; Rm-fvg 4: Relieve montañoso - Fondo de valle glaciar)

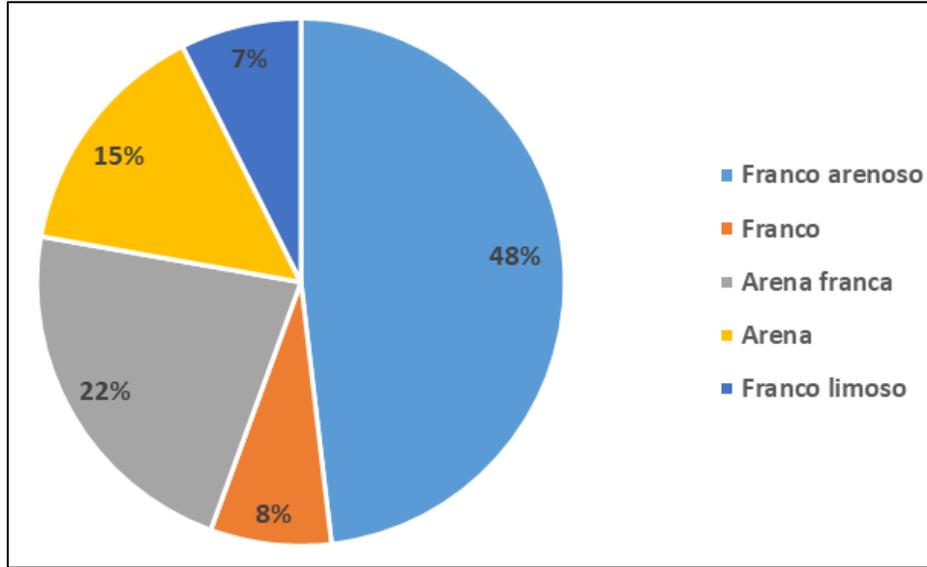


Figura 8. Resultados del análisis de tipo de textura del suelo en las muestras recolectadas en la microcuenca Cojup.

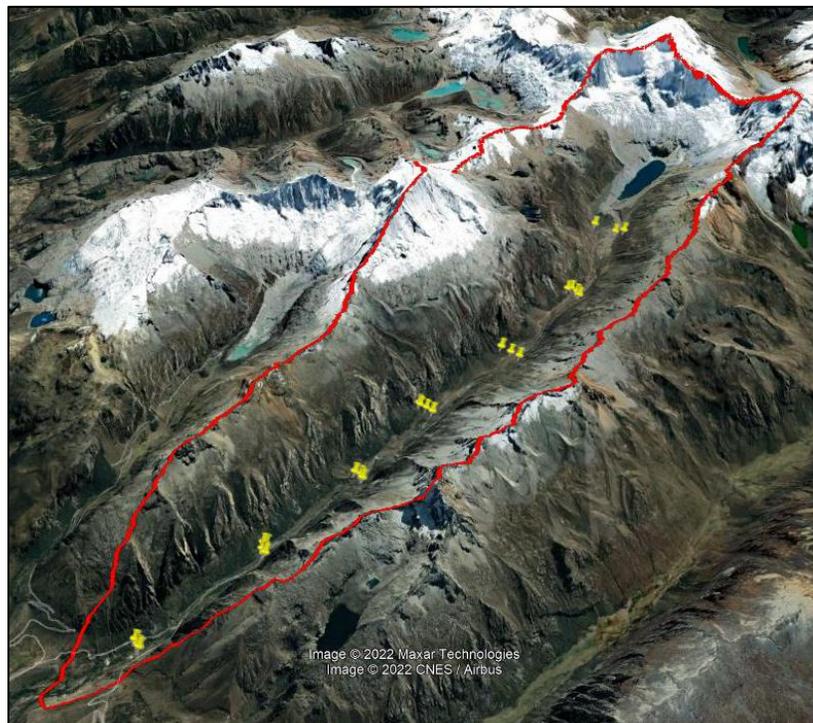


Figura 9. Zona de muestreo (color amarillo) ubicada en la microcuenca Cojup (color rojo). Figura tomada de Google Earth.

La zona de estudio fue dividida en 7 sectores para realizar una adecuada recolección de las muestras de suelo, en cada sector se distribuyeron aproximadamente 4 puntos de muestreo, teniendo así un total de 27 puntos de muestreo a lo largo de toda la zona de estudio, tal y como se presenta en la Figura 9. Las reservas totales de COS medidas hasta una profundidad de 40 cm, variaron de 2,3 a 54,3 t ha⁻¹ con un valor medio de 28,8 ± 17,4 t ha⁻¹, tal como se presenta en la Figura 10, y con respecto a las reservas de COS sobre los 10 cm superiores, fueron de 1,7 a 19,5 t ha⁻¹, con un valor medio de 10,4 ± 5,1 t ha⁻¹.

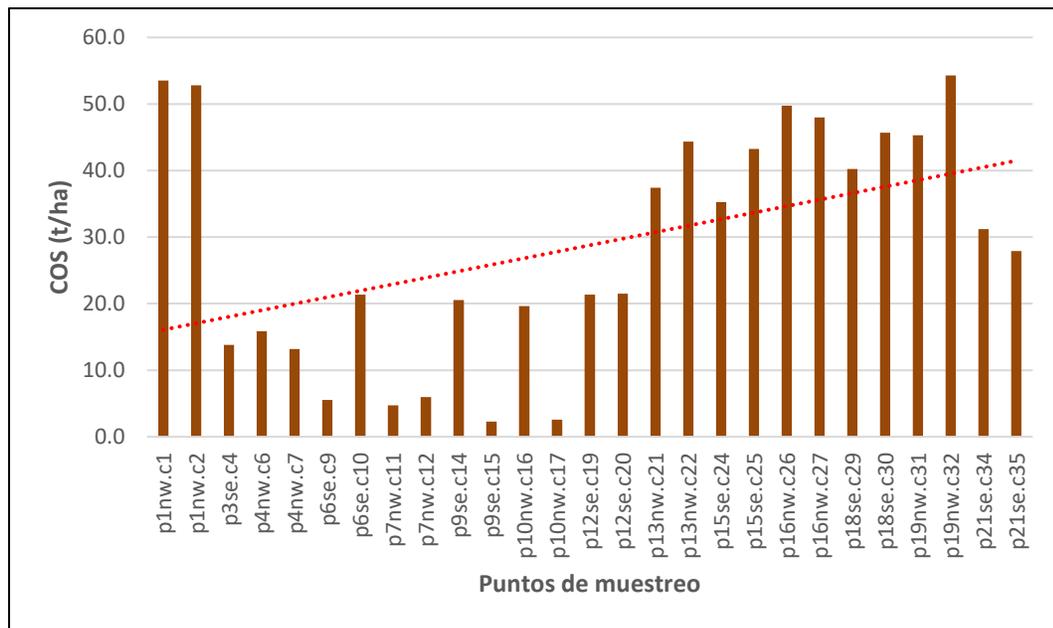


Figura 10. Distribución del COS por cada punto de muestreo, cada barra representa la suma del COS en todo el perfil del suelo muestreado.

En la Figura 10 se tiene la distribución promedio del COS según cada punto de muestreo, podemos observar que en líneas generales tiende a un comportamiento creciente a medida que se incrementa la altitud, a excepción de los dos primeros puntos que presentan un comportamiento atípico y se detalla más sobre esto en el capítulo de discusiones.

En la Figura 11 se presenta la distribución detallada del COS para los 4 niveles de profundidad muestreada y según cada punto de muestreo, podemos observar un comportamiento del COS que tiende a disminuir con la profundidad. La Figura 12 presenta de forma más extendida los valores de COS en los 4 niveles de profundidad estudiados, en líneas generales, se puede observar que la presencia de carbono disminuye a niveles más profundos del suelo.

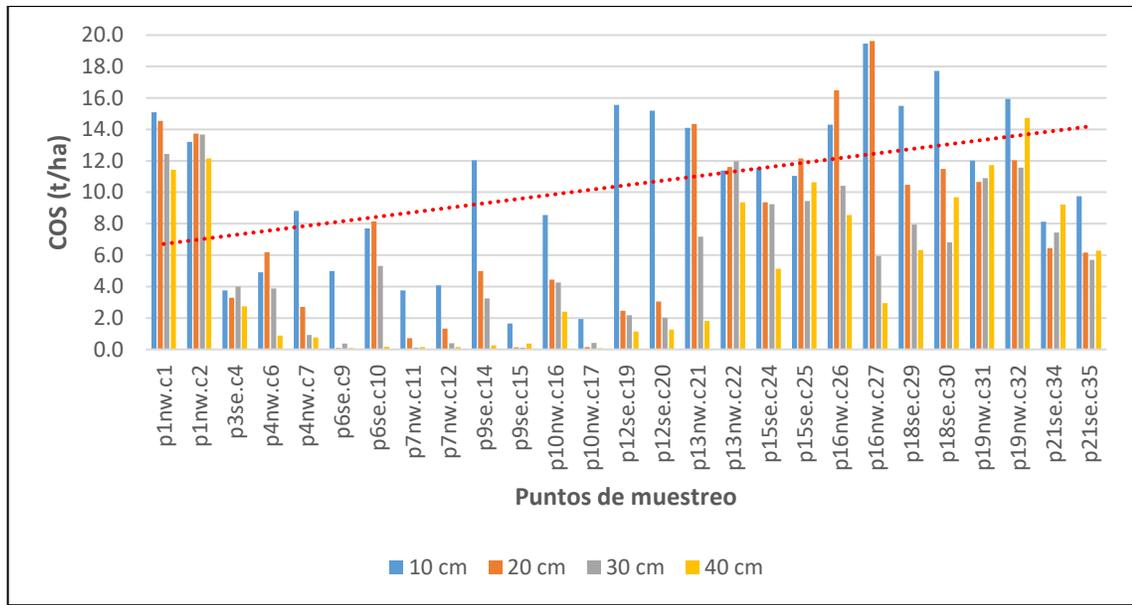


Figura 11. Distribución de COS detallado según los puntos de muestreo. Cada punto muestreado presenta cuatro niveles de profundidad (10, 20, 30 y 40 cm).

De acuerdo a la Figura 12, para las profundidades de 10 y 20 cm podemos observar que en promedio se mantienen con valores similares, pero con algunos valores inferiores para la profundidad de 20 cm. Para las profundidades de 30 y 40 cm podemos observar que a una profundidad de 30 cm se presentan mayores valores en comparación con el nivel de 40 cm de profundidad, con algunas excepciones, pero en general se muestra una disminución a una profundidad de 40 cm.

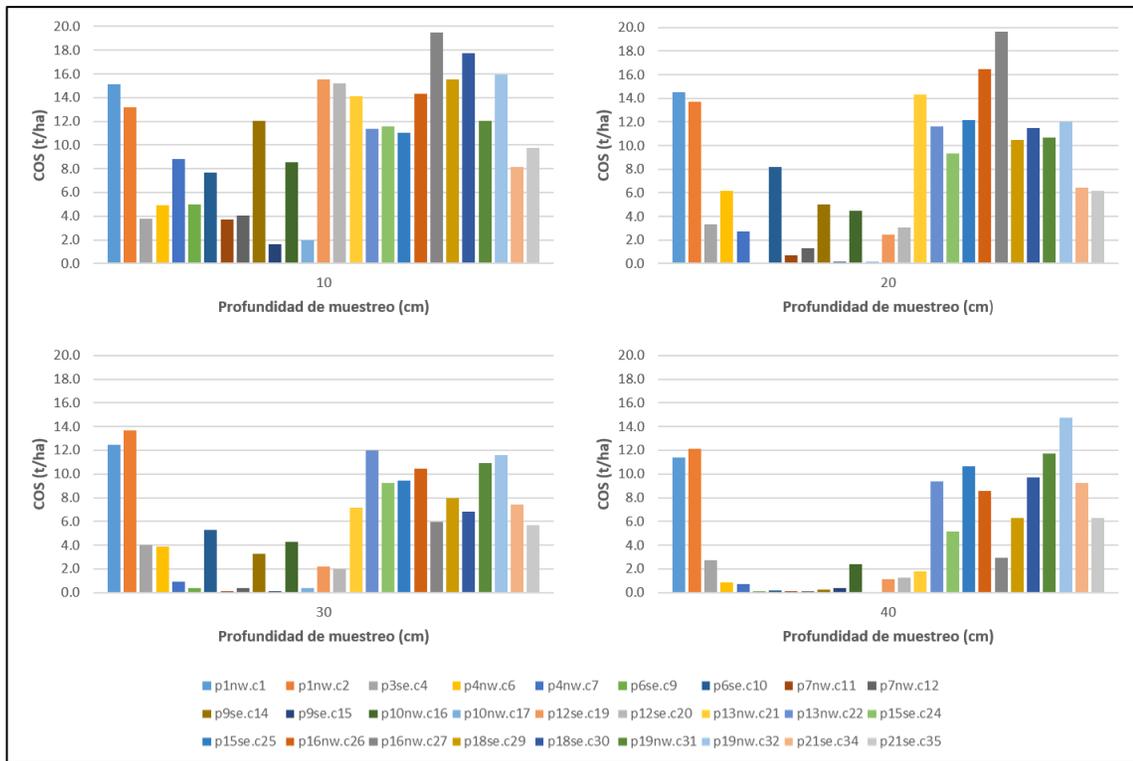


Figura 12. Distribución de COS por punto de muestreo y clasificado por el nivel de profundidad del suelo.

3.1.3. Modelamiento de la Distribución Espacial del COS en la Microcuenca Cojup.

Se estudió la variabilidad espacial del COS a lo largo de la microcuenca Cojup, esto se logró usando el método de interpolación geostadístico IDW (Inverse Distance Weight). Los resultados se presentan en la Figura 13, donde las zonas con coloración más intensa (tonos rojos) corresponden a zonas con mayor presencia de COS, y de manera contraria, zonas con coloración menos intensa (tonos azules) corresponden a zonas con menor cantidad de COS. Se observa que el COS obedece un comportamiento influenciado por la altitud, donde a mayor altitud se corresponden mayores valores de COS.

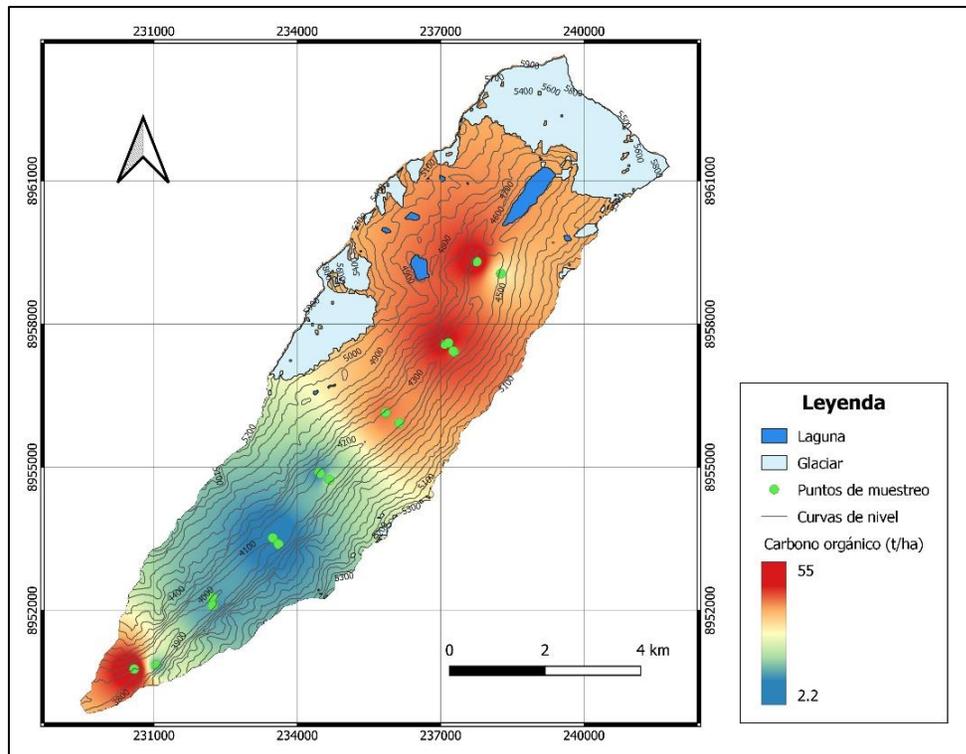


Figura 13. Mapa interpolado del contenido de COS en la microcuenca Cojup.

3.2. Modelo Empírico entre los Factores Climáticos y las Reservas de COS.

3.2.1. Información de los Factores Climáticos

Los factores climáticos considerados en el estudio son altitud, temperatura del aire y precipitación. A continuación, se presentan los resultados para cada factor en forma independiente.

Los valores de altitud en la zona de estudio se registraron para cada punto de muestreo y se presentan en la Figura 14.

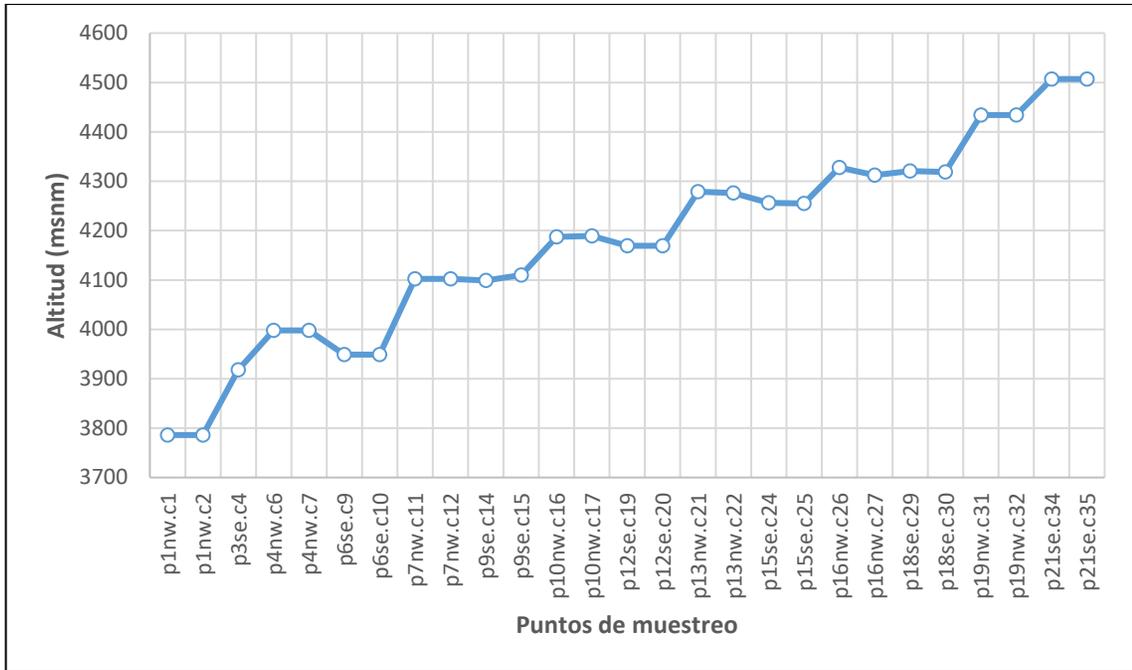


Figura 14. Variación de la altitud en la microcuenca Cojup según cada punto de muestreo.

En la Figura 14, se muestra la distribución de los puntos de muestreo de acuerdo a la altitud presente en la zona de estudio, los valores oscilan en un rango desde los 3786 hasta los 4507 m s.n.m., con un valor medio de 4156 m s.n.m., donde los primeros puntos de muestreo están ubicados en la parte baja de la microcuenca Cojup y van ascendiendo hasta la parte más alta de la misma (de izquierda a derecha).

Para las variables temperatura del aire y precipitación, se recopiló información histórica para la ciudad de Huaraz por un periodo de 40 años, entre los años 1981 hasta el 2020, con esta información se estudió el comportamiento de ambas variables a lo largo del tiempo, ver Figuras 15 y 16 respectivamente.

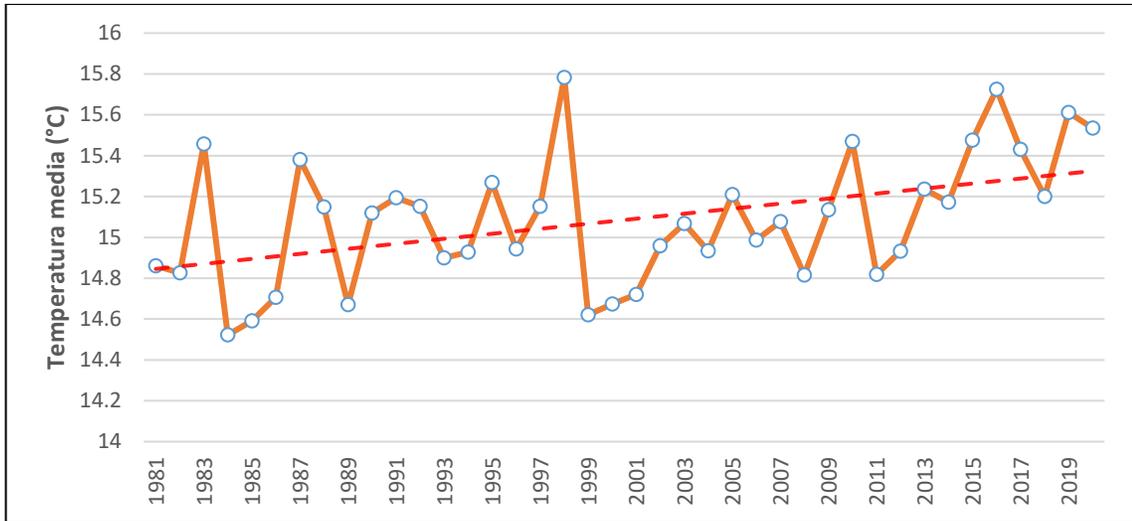


Figura 15. Temperatura media entre el periodo 1981 al 2020, valores corregidos para la ciudad de Huaraz (Hersbach et al, 2019)

Según la Figura 15, el comportamiento de la temperatura desde el año 1981 hasta el año 2020 muestra una tendencia de incremento a lo largo del tiempo.

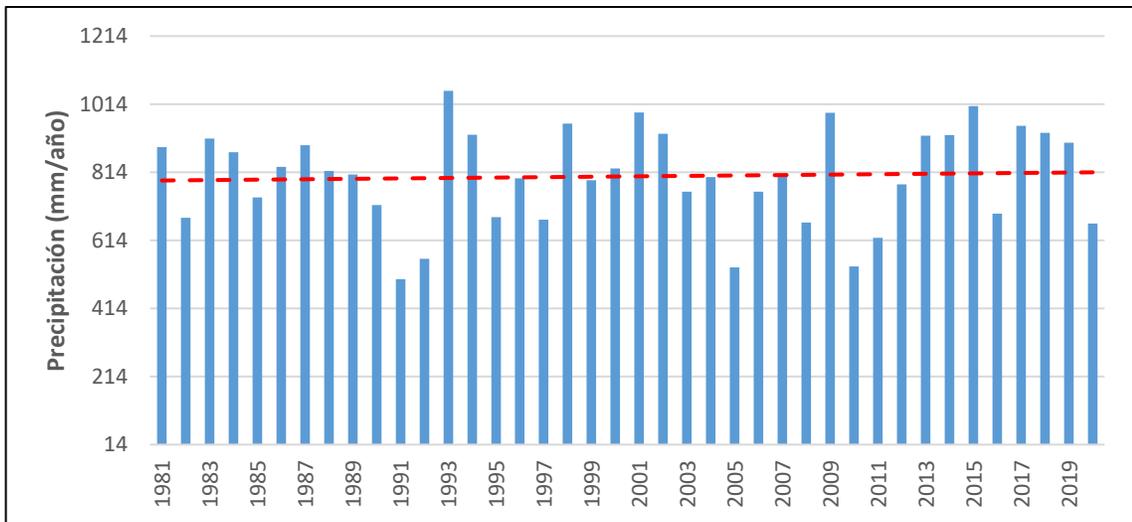


Figura 16. Precipitación anual entre el periodo 1981 al 2020, valores corregidos para la ciudad de Huaraz (Hersbach et al, 2019)

De acuerdo a la Figura 16, el comportamiento de la precipitación en los últimos 40 años presenta variabilidad temporal, con incrementos y disminuciones respecto a la media en diferentes años, pero no con una tendencia evidente de incremento o disminución a lo largo del periodo de estudio.

Con respecto a los factores climáticos en la zona de estudio, la temperatura media del aire presentó una variación de 5,1 a 10,2 °C con un valor medio de 7,4 °C, por su parte la precipitación presentó menor variación, con valores de 804,6 a 807,5 mm año⁻¹, con un valor medio de 806,2 mm año⁻¹, es decir, a lo largo de toda la microcuenca se presentan valores muy similares de precipitación, con una variación casi imperceptible desde la parte baja hacia la parte más alta de la zona de estudio. Tal como se presenta en la Figura 17.

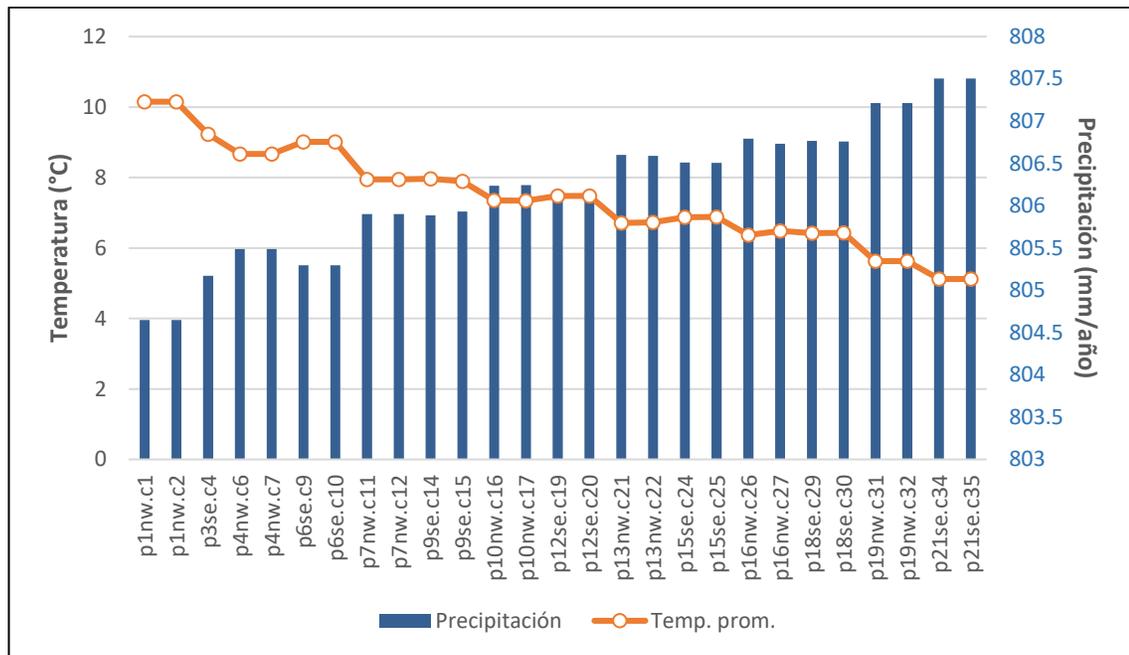


Figura 17. Temperatura media y precipitación anual entre el periodo 1981 al 2020, valores interpolados para cada punto de muestreo en la zona de estudio.

De acuerdo a la Figura 17, la precipitación y temperatura en los puntos de muestreo en la zona de estudio muestran un comportamiento opuesto, donde la parte baja de la zona de estudio presenta los menores valores de precipitación, y al mismo tiempo los valores más altos de temperatura. A medida que avanzamos hacia la parte alta de la zona de estudio, de izquierda a derecha en el gráfico, la altitud se incrementa y con ello la precipitación también, lo opuesto ocurre con la temperatura que cada vez presenta valores menores con respecto al inicial.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los factores climáticos hallados en la zona de estudio, detallado por cada punto de muestreo.

Tabla 3*Información de los factores climáticos para cada punto de muestreo*

Punto de muestreo	Altitud (m s.n.m.)	Temperatura (°C) (promedio anual)	Precipitación (mm año⁻¹) (promedio anual)
P1.NW.C1	3786	10,2	804,6
P1.NW.C2	3786	10,2	804,6
P3.SE.C4	3918	9,2	805,2
P4.NW.C6	3998	8,7	805,5
P4.NW.C7	3998	8,7	805,5
P6.SE.C9	3949	9,0	805,3
P6.SE.C10	3949	9,0	805,3
P7.NW.C11	4102	7,9	805,9
P7.NW.C12	4102	7,9	805,9
P9.SE.C14	4099	8,0	805,9
P9.SE.C15	4110	7,9	805,9
P10.NW.C16	4187	7,4	806,2
P10.NW.C17	4189	7,3	806,2
P12.SE.C19	4169	7,5	806,2
P12.SE.C20	4169	7,5	806,2
P13.NW.C21	4279	6,7	806,6
P13.NW.C22	4276	6,7	806,6
P15.SE.C24	4256	6,9	806,5
P15.SE.C25	4255	6,9	806,5
P16.NW.C26	4328	6,4	806,8
P16.NW.C27	4312	6,5	806,7
P18.SE.C29	4321	6,4	806,8
P18.SE.C30	4319	6,4	806,8
P19.NW.C31	4434	5,6	807,2
P19.NW.C32	4434	5,6	807,2
P21.SE.C34	4507	5,1	807,5
P21.SE.C35	4507	5,1	807,5

Nota: la codificación para los nombres de los puntos de muestreo se hizo teniendo en cuenta la numeración de los puntos, la orientación de los mismos según el cauce del río y la numeración de las calicatas.

Teniendo en cuenta los valores de temperatura y precipitación para cada punto de muestreo, se realizó la interpolación espacial en la zona de estudio y se obtiene lo siguiente, ver Figuras 18 y 19. Las zonas más bajas presentan valores más altos de temperatura, y en contraposición, las zonas con mayor altitud se corresponden con valores más bajos de temperatura, es decir, la temperatura va disminuyendo a medida que se incrementa la altitud, variando en $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. En el caso de la precipitación ocurre lo opuesto, los menores valores se ubican en la zona baja y se van incrementando a medida que se incrementa la altitud, variando en $2,9\text{ mm año}^{-1}$. La diferencia entre ambos factores radica en la magnitud del cambio, como se mencionó líneas atrás, el cambio en la precipitación es poco significativo.

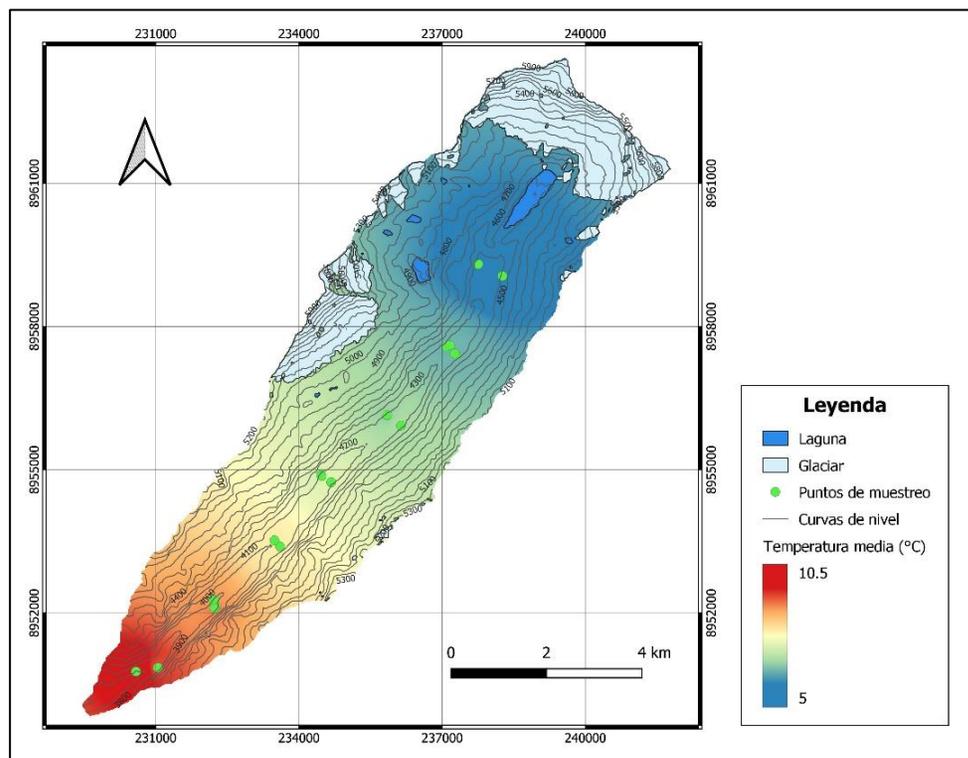


Figura 18. Mapa interpolado de la variable temperatura del aire, valor promedio para el periodo 1981-2020 en la microcuenca Cojup.

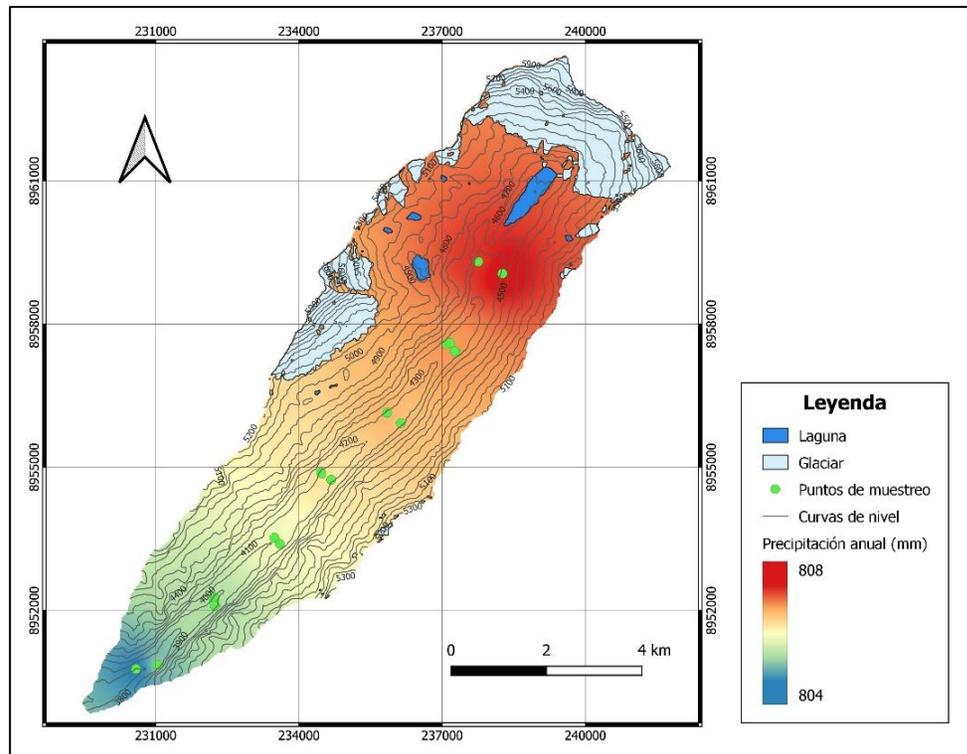


Figura 19. Mapa interpolado de la variable precipitación, valor promedio para el periodo 1981-2020 en la microcuenca Cojup.

3.2.2. Propuesta del Modelo Empírico

Para la determinación del modelo empírico que relacione los factores climáticos y el COS se verificó el grado de asociación lineal entre las variables de estudio, se realizaron gráficos de dispersión y se aplicó la prueba de correlación lineal de Pearson (Best y Roberts, 1975). Los resultados se muestran en las Figuras 20 y 21.

La Figura 20 muestra una gran dispersión de los datos de temperatura y COS con respecto a una correlación lineal, se puede presumir la existencia de algunos valores atípicos. Asimismo, el Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson (r) tiene un valor de $-0,31$, valor cercano a cero y con signo negativo, con un p -value $> 0,05$, lo cual representa una correlación lineal negativa baja entre la temperatura y el COS.

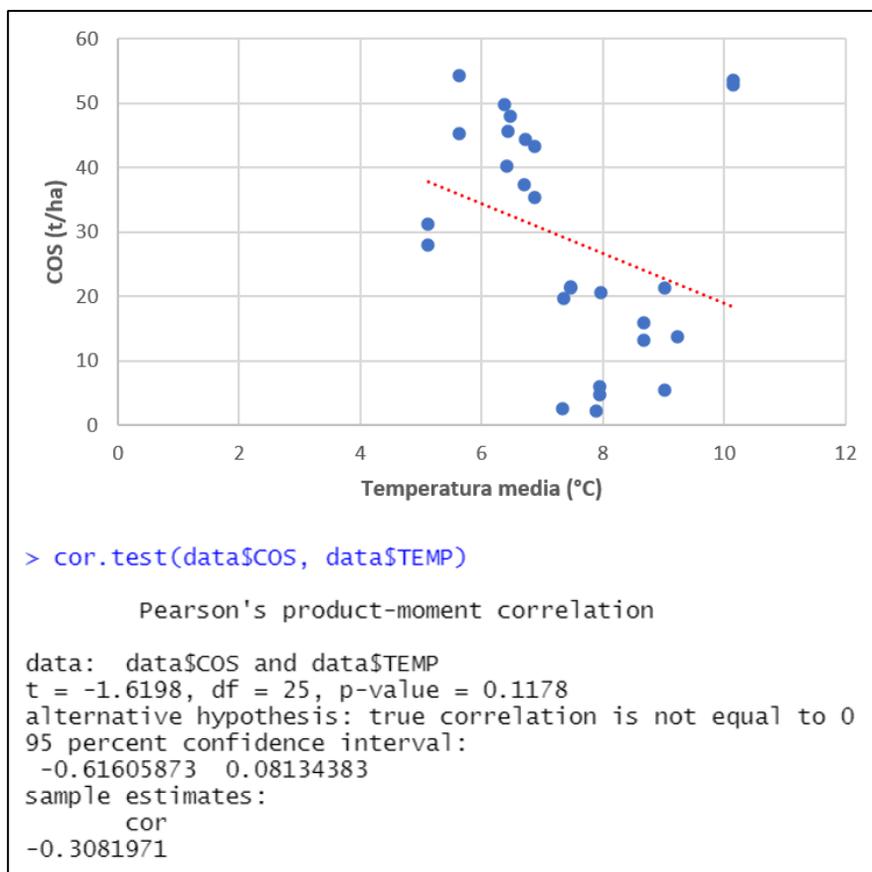


Figura 20. Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y COS.

De igual manera, la Figura 21 presenta gran dispersión de los datos de precipitación y COS con respecto a una correlación lineal. Asimismo, el valor de “r” es de 0,31, con un p-value > 0,05, lo cual representa una correlación lineal positiva baja entre las dos variables. Cabe resaltar que se presentó el mismo valor de “r” en la correlación entre la temperatura y el COS, pero con signo opuesto, lo cual es un indicio de que puede existir una relación y/o dependencia entre las variables independientes de temperatura y precipitación en la zona de estudio, ya que ambas se encuentran influenciadas indirectamente por la altitud.

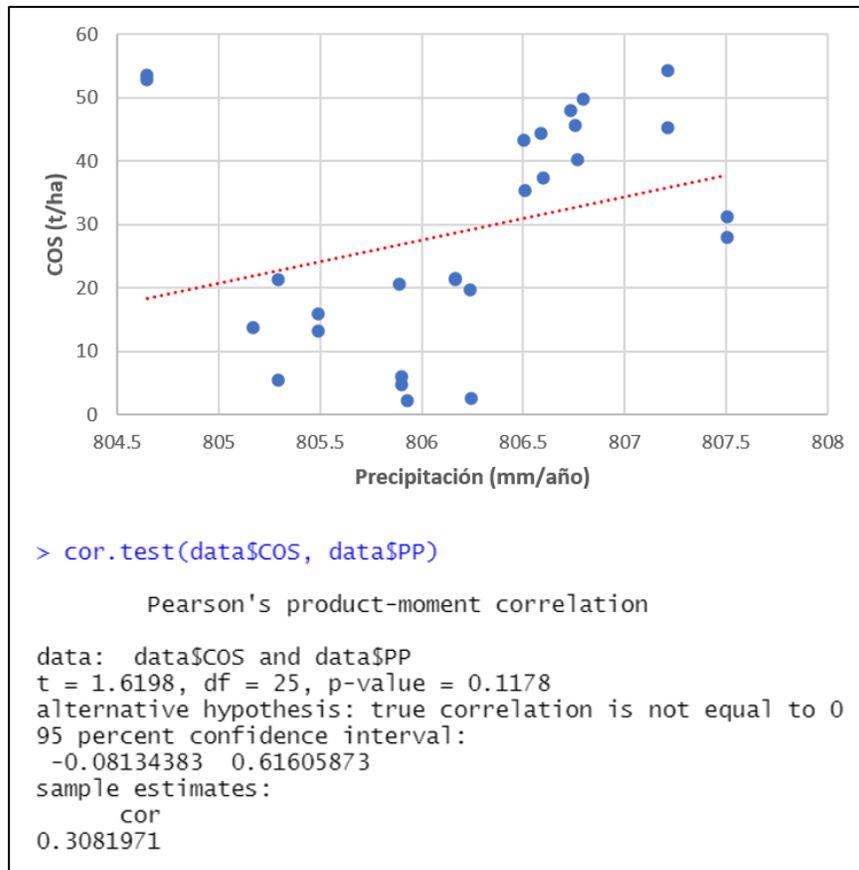


Figura 21. Correlación lineal de Pearson entre las variables precipitación y COS.

Se realizó un análisis similar al previo, para las variables independientes temperatura y precipitación, con un gráfico de dispersión y la prueba de correlación lineal de Pearson, los resultados se presentan en la Figura 22. La dispersión de los datos se ajusta de manera perfecta a una correlación lineal, con un valor para el coeficiente “r” igual a la unidad con signo negativo, esto evidencia un alto grado de relación y/o dependencia de estas variables. Por tal motivo, y teniendo en cuenta que la precipitación no obedece un comportamiento uniforme con respecto a la altitud y por ello es más compleja su interpolación y análisis, se considera omitir la variable precipitación para los análisis posteriores del modelo empírico.

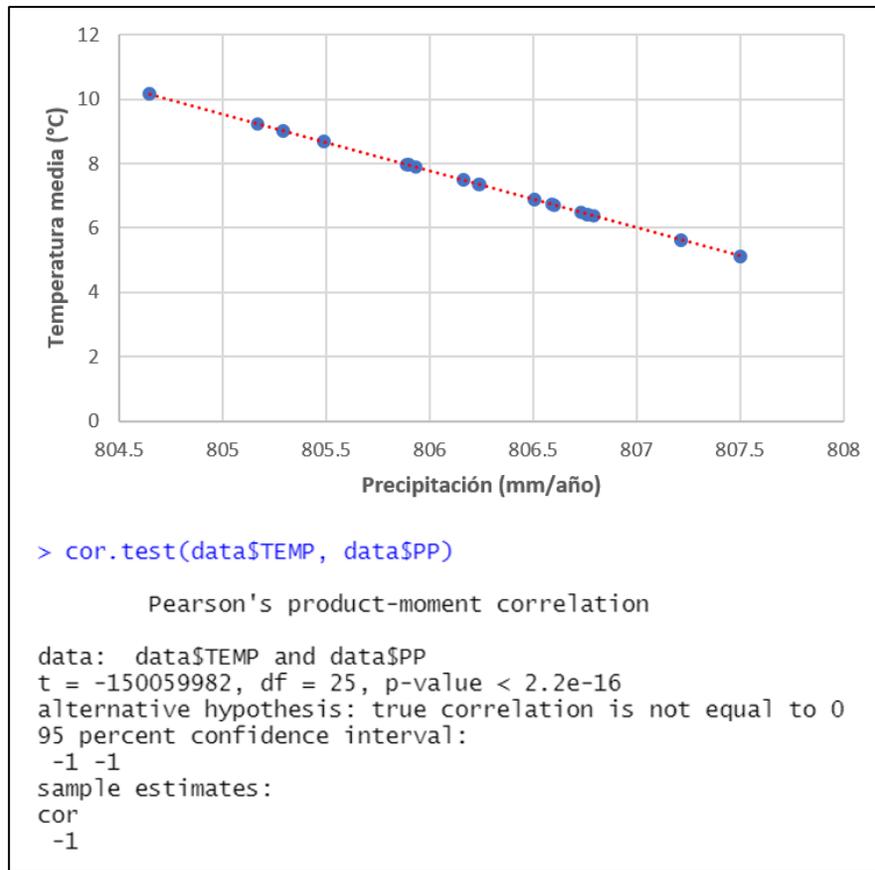


Figura 22. Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y precipitación. Posteriormente, teniendo como variables de estudio a la temperatura del aire y el COS, se realizaron análisis de regresión mediante gráficos de línea ajustada a niveles de confianza de 95 y 90 %. La Figura 23 representa un nivel de confianza de 95 %, y de acuerdo al intervalo de predicción mostrado en la figura todos los valores se encuentran dentro de dicho intervalo.

De la misma manera, se realizó el gráfico de línea ajustada para un nivel de confianza de 90 %, ver Figura 24, en el cual se presentan 2 valores atípicos según el intervalo de predicción de 90 %. Estos valores fueron removidos y posteriormente se continuó el análisis sin tener en cuenta dichos valores.

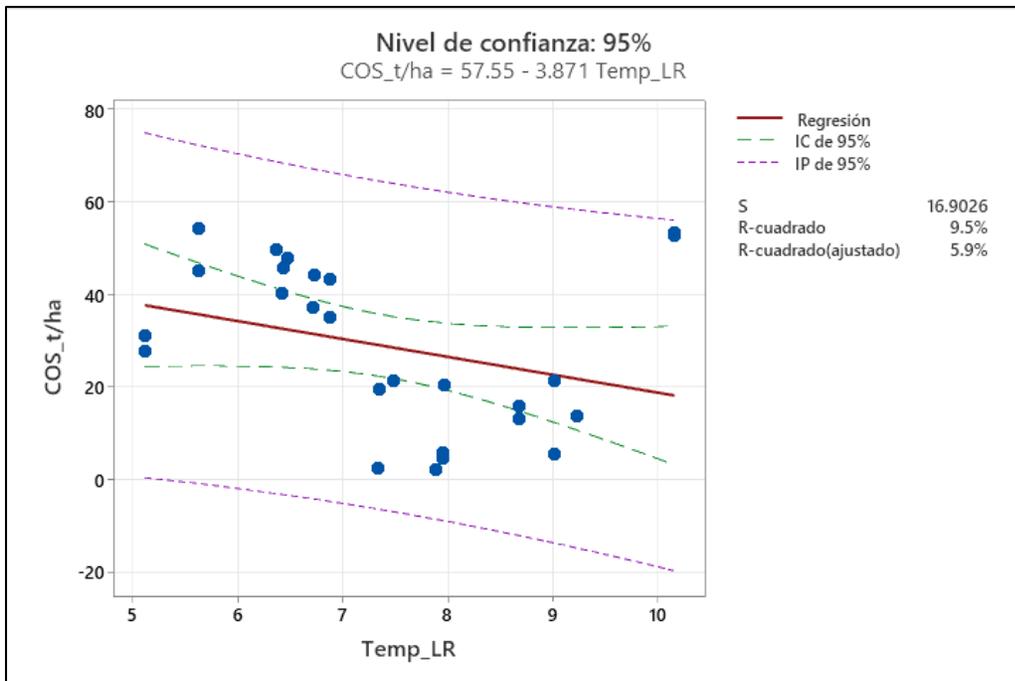


Figura 23. Intervalos de confianza y predicción para las variables temperatura del aire y COS a un nivel de confianza de 95 %.

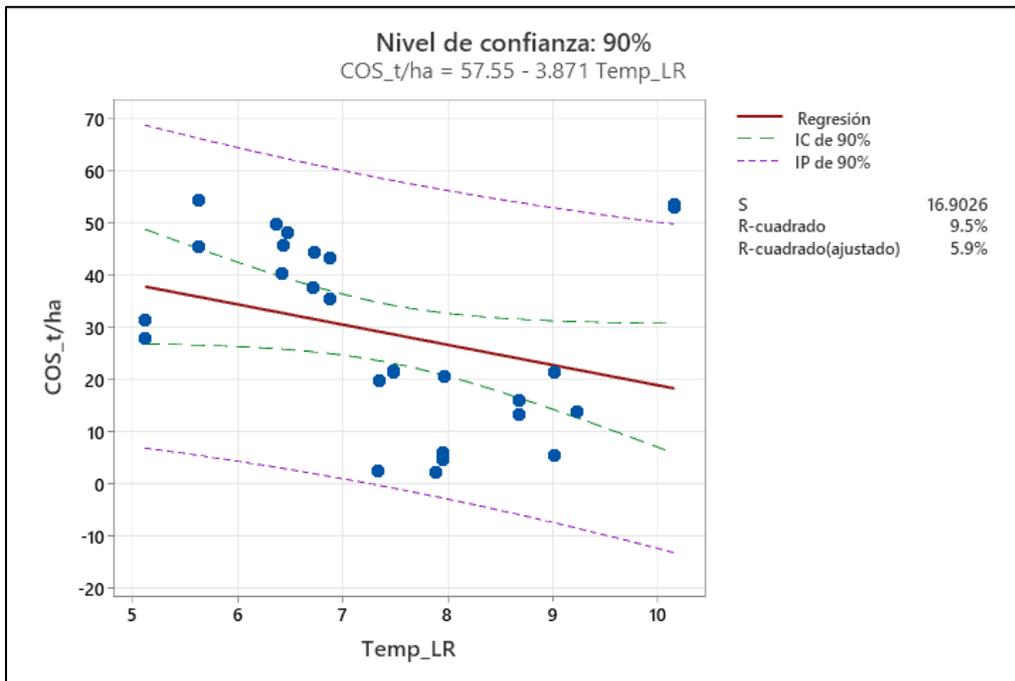


Figura 24. Intervalos de confianza y predicción para las variables temperatura del aire y COS a un nivel de confianza de 90 %.

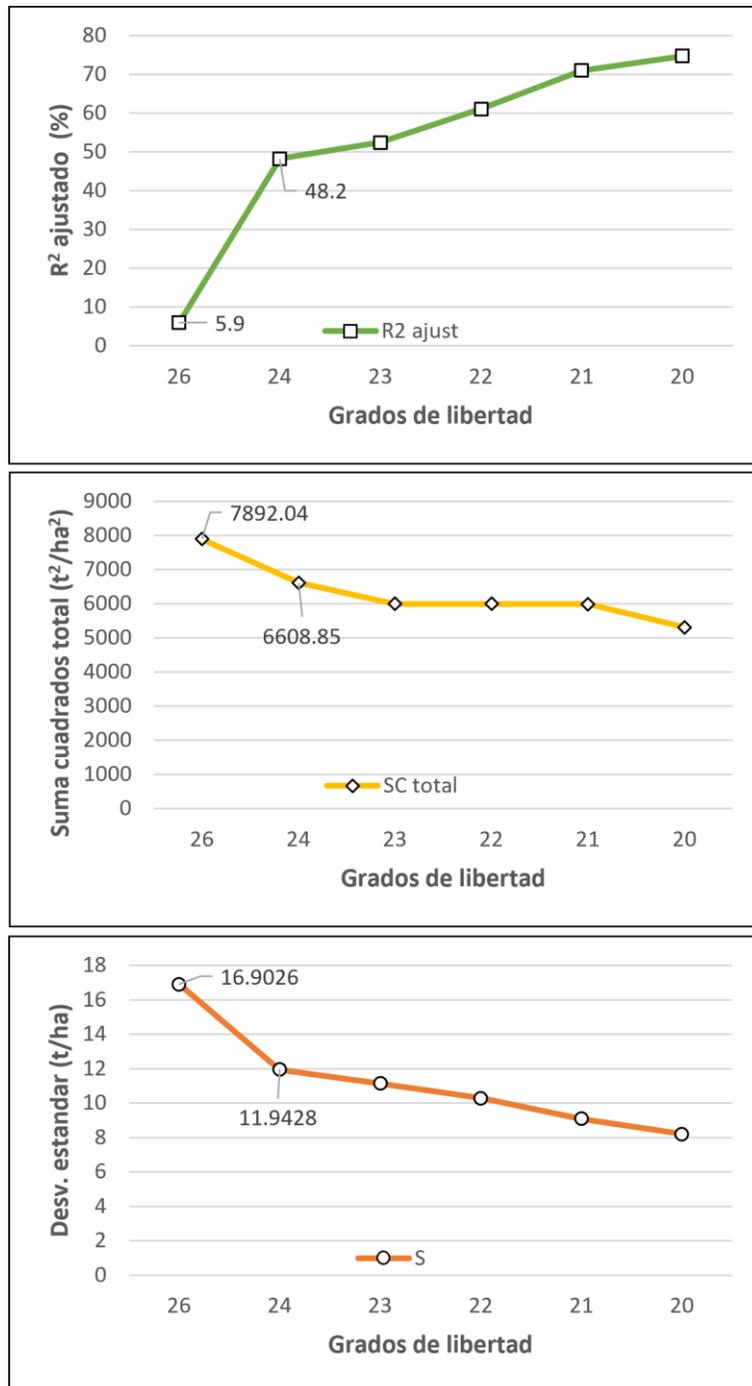


Figura 25. Proceso de eliminación progresiva de los valores atípicos. Se analizaron los parámetros estadísticos R² ajustado, desviación estándar y suma de cuadrados total.

Asimismo, se consideró continuar con el proceso de eliminación de los valores atípicos, de forma paulatina, para cada valor atípico extraído se realizó el análisis de regresión y se tuvo en cuenta los parámetros estadísticos más relevantes como el coeficiente de

determinación ajustado, desviación estándar y suma de cuadrados total para cada regresión. Los resultados se presentan en la Figura 25.

De acuerdo a los gráficos de la Figura 25, los grados de libertad representan la cantidad de datos con la que se está realizando el análisis de regresión. El valor de R^2 ajustado se incrementa significativamente para los grados de libertad entre 26 y 24, desde un valor de 5,9 % hasta un valor de 48,2 %, posterior a este cambio el incremento es paulatino y en menor magnitud, llegando a superar el 70 % para un valor de 20 grados de libertad. Considerando a la Desviación Estándar (S), entre los 26 a 24 grados de libertad presenta un cambio considerable, disminuyendo desde los 16,9 t ha⁻¹ hasta 11,9 t ha⁻¹, posterior a ello la disminución continua en menor medida, llegando hasta un valor cercano a 8 t ha⁻¹ para 20 grados de libertad. Finalmente, con respecto a la suma de cuadrados total (SC total), entre los 26 a 24 grados de libertad presenta un cambio considerable, disminuyendo desde los 7892,0 t² ha⁻² hasta 6608,9 t² ha⁻², luego continúa disminuyendo en menor grado hasta llegar a un valor cercano a los 5000 t² ha⁻² para 20 grados de libertad.

Por todo lo mencionado anteriormente, se consideraron 24 grados de libertad como el valor óptimo para continuar con el análisis. No se justifica la disminución de más grados de libertad por un incremento poco significativo en los parámetros estadísticos analizados.

Teniendo definido la cantidad de grados de libertad y habiendo excluido los valores atípicos, se realizó un nuevo análisis de dispersión y se aplicó la prueba de correlación lineal de Pearson a los datos filtrados, obteniendo los siguientes resultados, ver Figura 26.

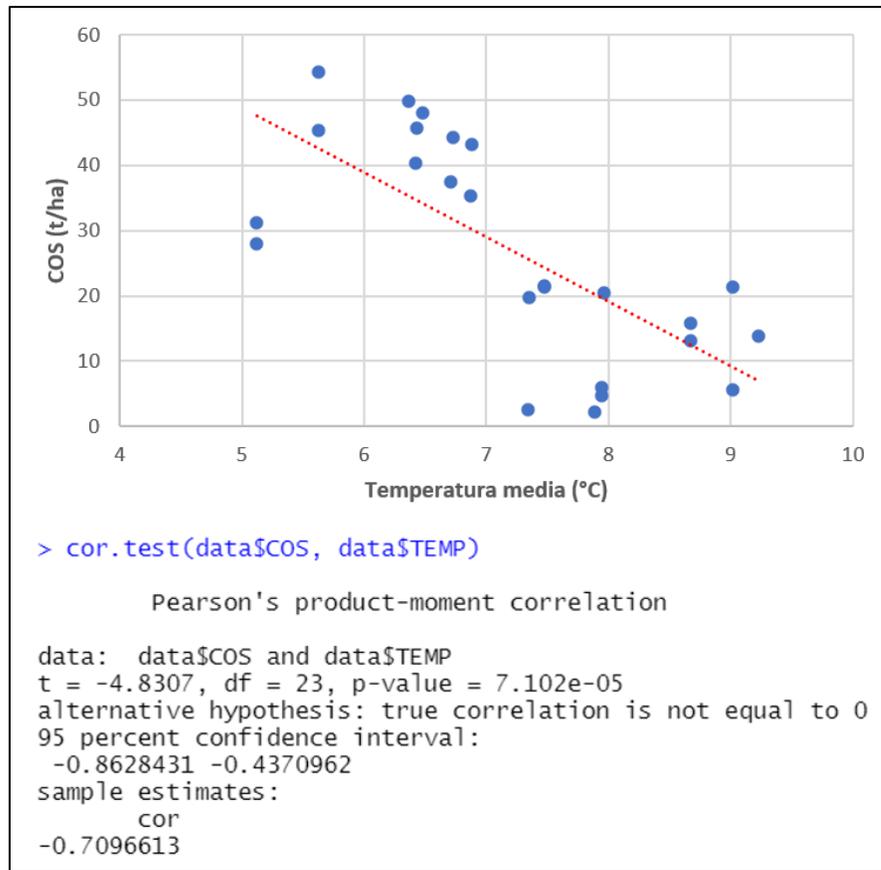


Figura 26. Correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y COS después de la exclusión de los valores atípicos.

De la Figura 26 se puede observar una correlación lineal significativa entre la temperatura media y el COS, tanto gráficamente como con el valor del coeficiente “r” igual a -0,71 y un p-value < 0,05. Esta correlación negativa se interpreta en el sentido que a medida que los valores de temperatura disminuyen los valores de COS se van incrementando, y ocurre lo mismo de manera inversa. En la Figura 28 se presenta una comparación espacial donde se aprecia con claridad la correlación negativa entre estas variables.

Continuando con el procedimiento, se realizó la construcción de un modelo empírico en base a una regresión lineal, de tal manera que represente la relación entre las variables temperatura media y COS, los parámetros estadísticos de la regresión se muestran en la Figura 27. Se presenta un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) moderado, con un valor de 0,482 y un nivel de significancia < 0,05.

```
> summary(lm(data$COS~data$TEMP))

Call:
lm(formula = data$COS ~ data$TEMP)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-23.046  -5.821   2.772  11.113  14.539

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   98.144     14.954   6.563 1.07e-06 ***
data$TEMP     -9.883      2.046  -4.831 7.10e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 11.94 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5036, Adjusted R-squared:  0.482
F-statistic: 23.34 on 1 and 23 DF, p-value: 7.102e-05
```

Figura 27. Parámetros estadísticos para la regresión lineal entre la temperatura media y el COS. El valor de R^2 ajustado es de 0,482 con un valor de significancia $< 0,05$ y los coeficientes del modelo son -9,88 para la temperatura media y 98,14 para el intercepto.

Adicionalmente, se realizó una comparación espacial entre la temperatura media y el COS, los resultados se presentan en la Figura 28. Se presenta el comportamiento espacial entre la temperatura media y las reservas de COS, donde se observa que a temperaturas bajas le corresponden valores medios y altos de COS, a temperaturas medias le corresponden valores bajos de COS, y a temperaturas más altas le corresponden valores altos de COS, en específico en la parte baja de la zona de estudio.

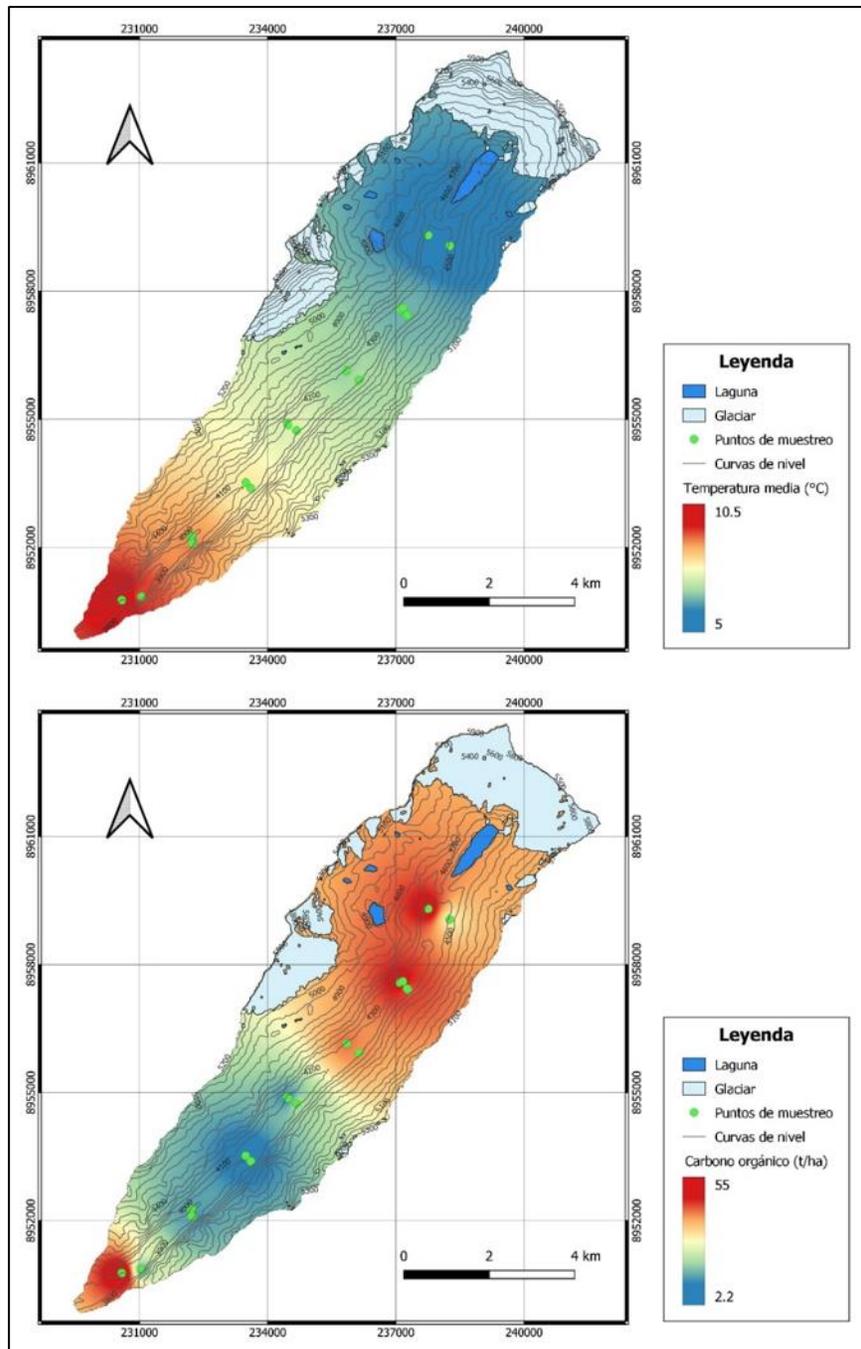


Figura 28 Comparación espacial entre la temperatura media (parte superior) y las reservas de COS (parte inferior).

3.2.3. Validación del Modelo Empírico

Para validar el modelo empírico obtenido se utilizó el paquete denominado “caret”, en el software R Studio, este emplea el método de validación denominado “Repeated k-Fold-Cross-Validation” (Kuhn, 2008). El método dividió los datos de forma aleatoria en “k”

grupos, donde el valor de “k” representa al número de grupos en el cual se dividen los datos para realizar la validación, luego uno de los grupos se empleó como validación y el resto de grupos se emplearon para entrenar el modelo, el proceso se repitió k veces usando grupos distintos como validación en cada iteración. Asimismo, el proceso completo se repite una cantidad de “n” veces, para el presente estudio se consideró usar 50 repeticiones. Las repeticiones ayudan a disminuir la variabilidad y la sobreestimación del error que se produce, esto debido a la inclusión aleatoria de los datos en los grupos de entrenamiento y validación. Finalmente, se obtuvo la estimación de parámetros estadísticos para cada repetición, de los cuales se analizó el promedio de todas las repeticiones.

Se analizaron tres parámetros estadísticos (R^2 , RMSE y MAE) para evaluar el comportamiento del modelo empírico ante la validación cruzada con diferentes valores de “k” (desde un valor $k = 2$ hasta $k = 17$). De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 29, se tiene el comportamiento de los parámetros estadísticos para 16 valores diferentes de “k”. Con respecto al coeficiente de determinación (R^2) se presenta un valor inicial de 0,53 para $k = 2$, el cual se va incrementando a medida que se varía el número de grupos, hasta llegar a un valor de 1,00 para $k = 13$, este valor se mantiene constante hasta el valor de $k = 17$, por tal motivo no se continuó con el análisis para mayores valores de k. Con respecto a la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se presentan valores entre 12,57 y 11,16 t ha⁻¹ para valores de “k” entre 2 y 17, respectivamente. Con respecto al Error Absoluto Medio (MAE) se observa que los valores fluctúan entre 10,49 y 10,65 t ha⁻¹, cuando varía el número de grupos de 2 a 17 para realizar la validación.

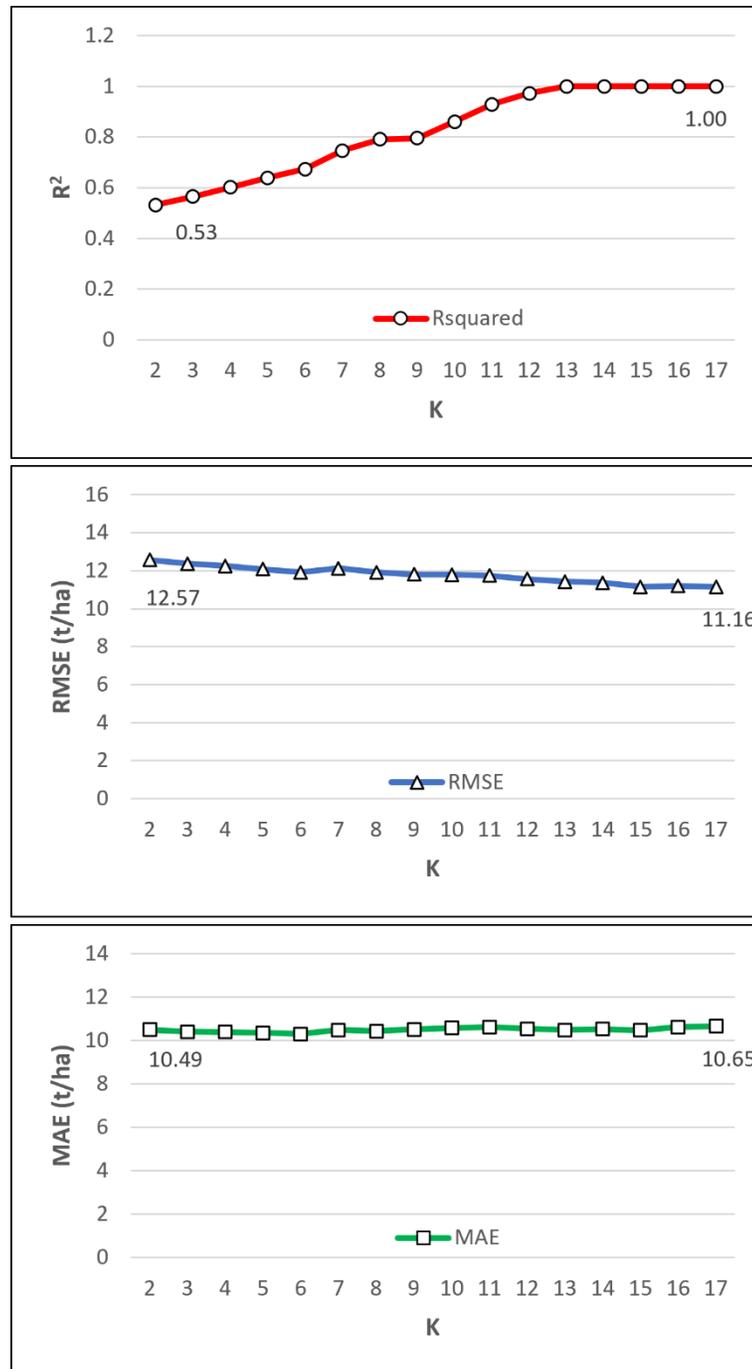


Figura 29. Parámetros estadísticos para analizar la validación cruzada con diferentes valores para el factor “k”.

3.3. Proyección de la Probable Dinámica del COS y Determinación del Impacto del Cambio Climático Sobre las Reservas de COS.

Los escenarios futuros de cambio climático están definidos por las rutas de concentración representativas (RCPs por sus siglas en inglés), estos son escenarios que establecen niveles de forzamiento radiativo hacia futuro. En términos generales, se entiende al forzamiento radiativo como la diferencia entre la energía absorbida por la tierra y la energía irradiada hacia el espacio exterior, un valor positivo de este se traduciría como un calentamiento del sistema climático, y un enfriamiento para un valor negativo. Las rutas RCP4,5 y RCP8,5 son escenarios futuros que establecen niveles de forzamiento radiativo de 4,5 y 8,5 $W m^{-2}$ para el año 2100, respectivamente. Estos han sido simulados con el modelo de evaluación del cambio global (GCAM por sus siglas en inglés), los RCPs incluyen las emisiones globales a largo plazo de gases de efecto invernadero, especies de vida corta, usos y cobertura de la tierra en un sistema económico global (Thomson et al, 2011).

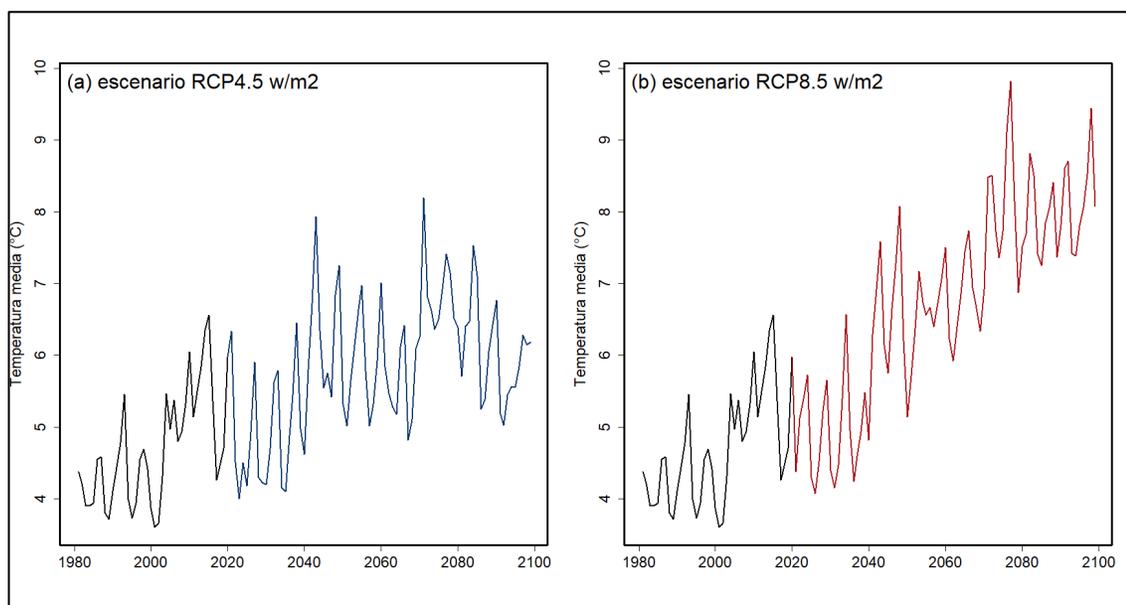


Figura 30. Proyecciones futuras de la temperatura del aire según dos escenarios futuros de cambio climático. Líneas negras corresponden al periodo histórico entre 1981 hasta 2020, y las líneas de color para el periodo futuro entre 2021 hasta 2099.

El presente estudio consideró los escenarios futuros de cambio climático RCP4,5 y RCP8,5, para la variable temperatura del aire. Los datos climáticos regionales se

obtuvieron descargando las salidas del modelo climático regional denominado ETA, desarrollados por el Centro de Previsión Meteorológica y Estudios Climáticos (CPTEC) del Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil (INPE), el cual considera como fuente de entrada los datos generados por el modelo climático global denominado MIROC5 (Chou et al, 2014a; 2014b). Con respecto a la ubicación geográfica, se consideró un punto dentro de la zona de estudio, cercano a la laguna Palcacocha, la cual está ubicada en la parte alta de la zona de estudio, las coordenadas de dicho punto son: longitud = -77,4 y latitud = -9,4. Los valores de temperatura fueron corregidos con valores observados, los cuáles han sido registrados por la estación meteorológica ubicada en la laguna Palcacocha. Las series de tiempo generadas con los valores de temperatura del aire, para ambos escenarios futuros, se pueden observar en la Figura 30.

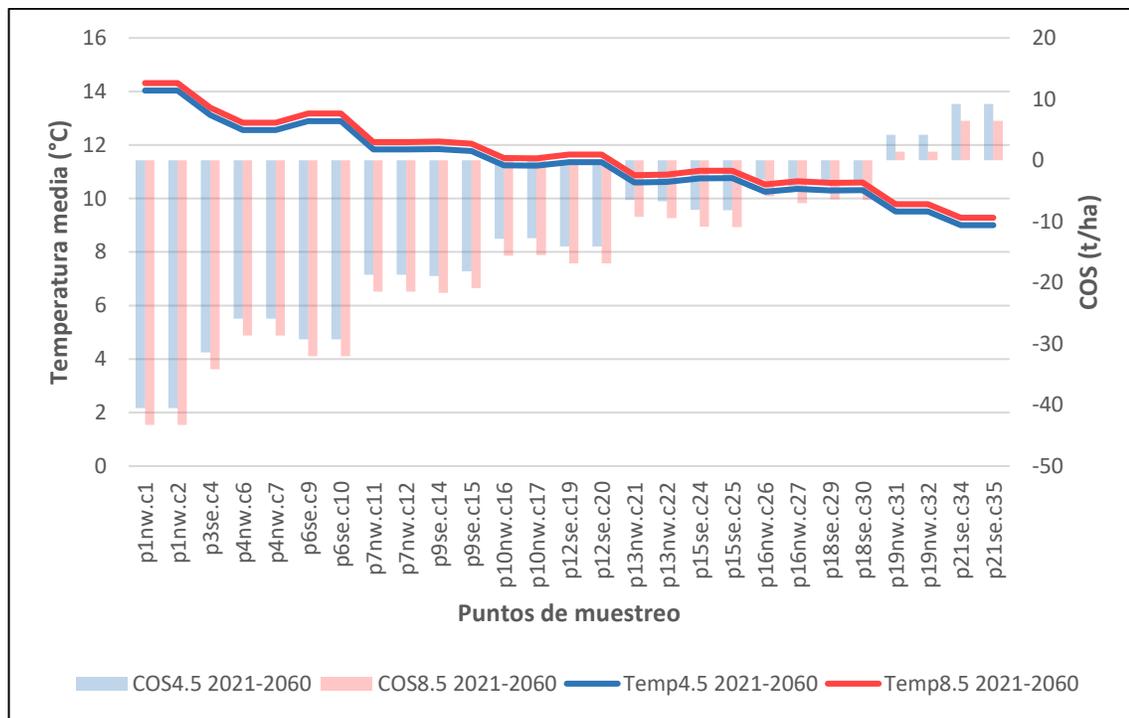


Figura 31. Primer periodo futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de temperatura del aire (valores en el eje izquierdo) para cada punto de muestreo.

Posteriormente, se realizó la interpolación espacial de la temperatura y se obtuvieron los valores para cada punto de muestreo. Estos valores fueron agrupados en 2 periodos de tiempo futuro, cada uno de 40 años aproximadamente, el primer periodo futuro desde el 2021-2060 y el segundo desde 2061-2099. Es decir, la temperatura mostrada para el

primer período representa el promedio de las temperaturas registradas entre los años 2021 al 2060, de la misma manera para el segundo periodo. Así, el primer periodo se puede observar en la Figura 31, donde la línea de color azul representa a un contexto climático según el escenario futuro RCP4,5 y la de color rojo al escenario RCP8,5. Podemos observar que la diferencia entre ambos escenarios es mínima, presentan valores muy similares de temperatura del aire para cada punto de muestreo.

Asimismo, teniendo los valores futuros de temperatura para cada punto de muestreo, se obtuvo la proyección de los posibles valores futuros de COS para este periodo de tiempo, ver Figura 32. Las barras de color verde representan los valores actuales de COS al 2022 (línea base COS), las barras de color azul y rojo mantienen la misma identificación de color, escenarios RCP4,5 y RCP8,5, respectivamente.

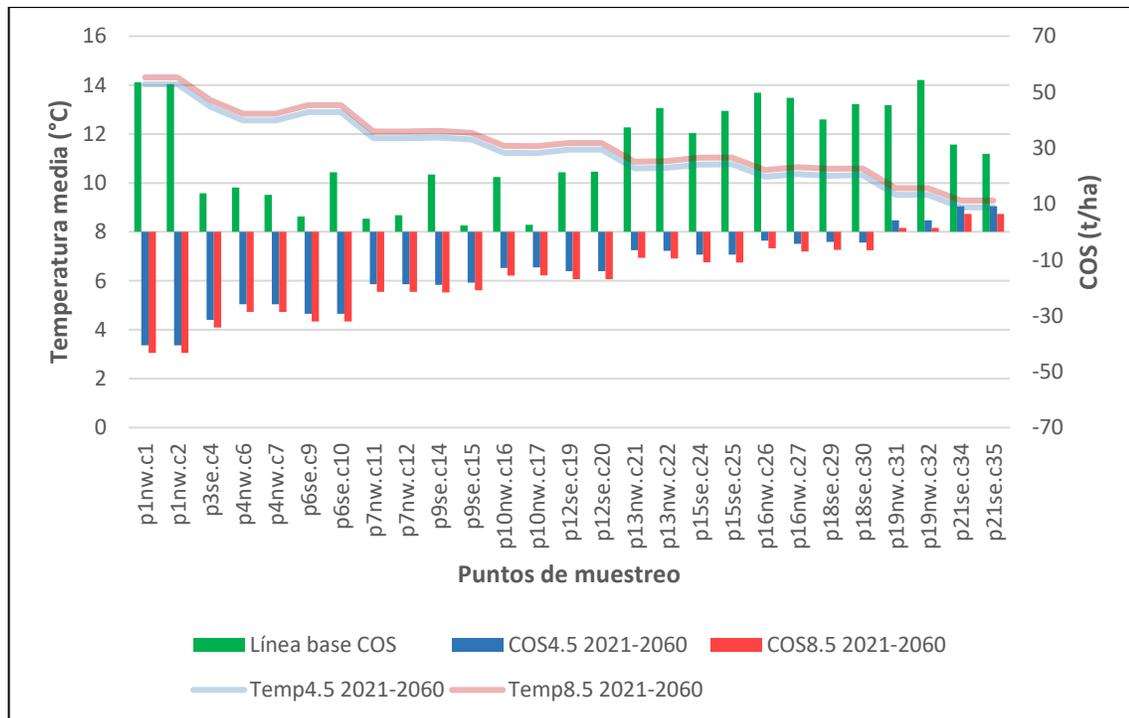


Figura 32. Primer período futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de COS (valores en el eje derecho) para cada punto de muestreo.

La Figura 33 muestra los valores futuros de la temperatura del aire para el segundo periodo entre 2061-2099. Se puede observar que la diferencia entre los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 es más acentuada en comparación al primer periodo, el segundo escenario presenta valores más elevados de temperatura para todos los puntos de muestreo.

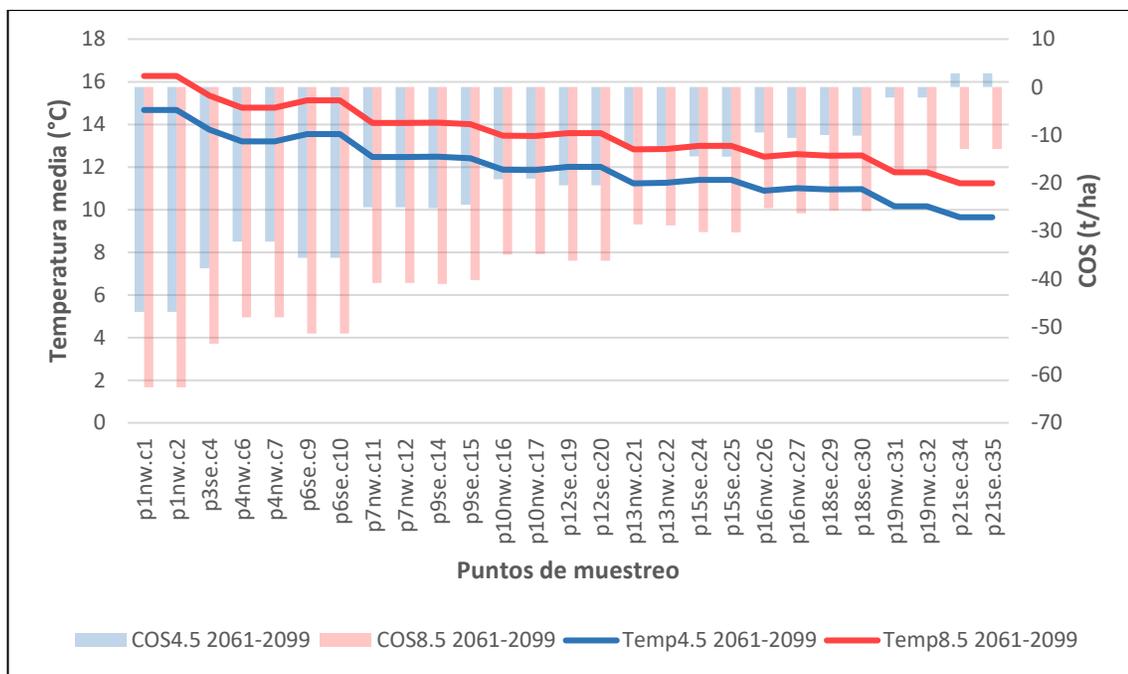


Figura 33. Segundo periodo futuro 2061-2099. Proyecciones futuras de temperatura del aire (valores en el eje izquierdo) para cada punto de muestreo.

De la misma manera, se presenta la proyección de los posibles valores futuros de COS para este segundo periodo de tiempo, ver Figura 34.

En términos generales, las Figuras 32 y 34 presentan valores negativos de reservas de COS para todos los puntos de muestreo presentados, a excepción de algunos puntos que se detallan a continuación. Para el primer periodo de tiempo entre 2021-2060, la Figura 32 presenta cuatro valores positivos de COS para los puntos denominados “p19nw.c31”, “p19nw.c32”, “p21se.c34” y “p21se.c35”, tanto para los escenarios RCP4,5 como RCP8,5. Con respecto al segundo periodo de tiempo entre 2061-2099, la Figura 34 presenta sólo dos valores positivos de COS para los puntos denominados “p21se.c34” y “p21se.c35”, esto con respecto al escenario RCP4,5, según el escenario RCP8,5 los valores de COS para estos puntos de muestreo mencionados presentan valores negativos. Todos los demás puntos de muestreo presentan valores negativos de COS, donde los valores más negativos se presentan en los primeros puntos de muestreo, los cuales pertenecen a la parte baja de la zona de estudio y se corresponden con valores más altos de temperatura.

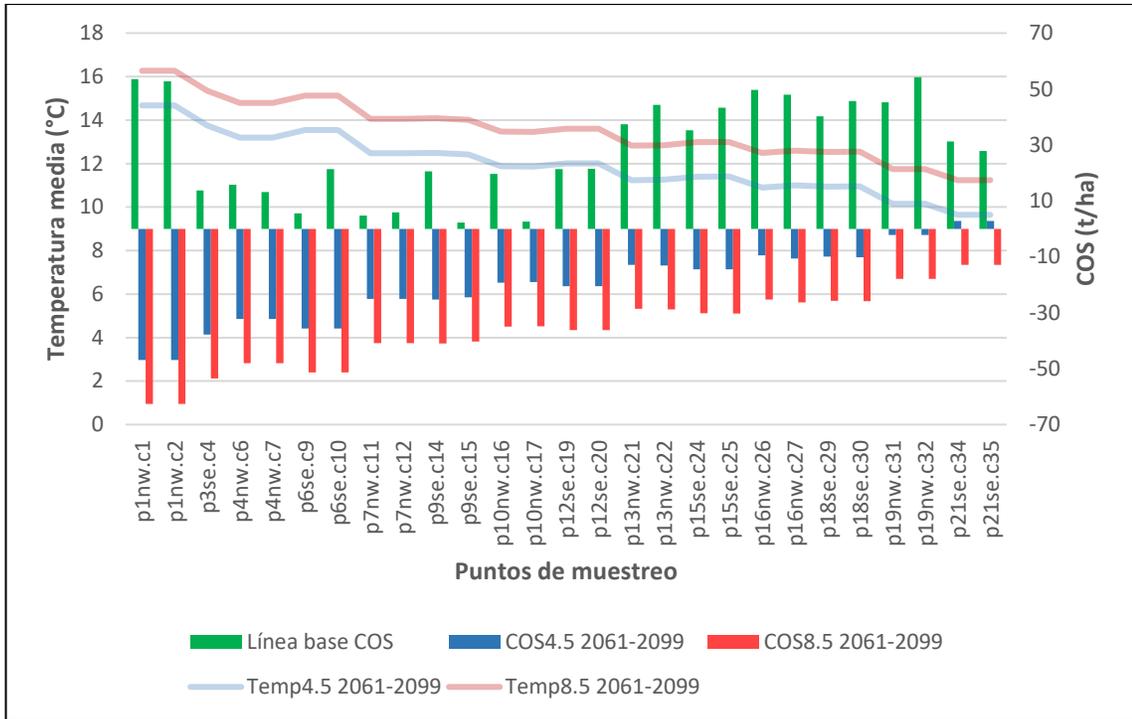


Figura 34. Segundo periodo futuro 2021-2060. Proyecciones futuras de COS (valores en el eje derecho) para cada punto de muestreo.

DISCUSIÓN

Las Figuras 10 y 13 muestran los resultados de COS encontrados en las muestras de suelo analizadas en la presente investigación, se observa que el comportamiento del COS es influenciado por la altitud, esto debido a que los puntos de muestreo están ubicados a diferentes niveles altitudinales en forma creciente, desde la izquierda hacia la derecha en el gráfico, en forma general se concluye que las zonas con mayor altitud presentan mayores valores de COS, esto va acorde a lo encontrado por Solano et al. (2018).

En la Figura 10 se muestra la distribución promedio del COS detallado para cada punto de muestreo, en líneas generales tiende a un comportamiento creciente a medida que se incrementa la altitud, pero en los dos primeros puntos denominados “p1nw.c1” y “p1nw.c2” se observan valores muy elevados de COS en comparación con los valores encontrados en puntos cercanos, esto puede explicarse debido a condiciones exclusivas de la zona de muestreo, de igual modo, esto guarda relación con lo que mencionan Van der Wal y de Boer (2017) con respecto a las propiedades y beneficios de la descomposición de la MOS. En las inspecciones en campo se constató la abundante presencia de cobertura vegetal y la intensa coloración oscura del suelo, muy superior en comparación con las demás zonas de muestreo, lo cual es un probable indicador de grandes cantidades de COS.

En la Figura 11 se presenta la distribución detallada del COS para los 4 niveles de profundidad muestreada y agrupado para cada punto de muestreo, podemos observar un comportamiento del COS que tiende a disminuir con la profundidad de muestreo. La Figura 12 presenta de forma más extendida los valores de COS en los 4 niveles de profundidad estudiados, en líneas generales, la presencia de carbono disminuye a niveles más profundos del suelo, tal y como lo mencionan algunos autores (Yang et al., 2018; Solano et al., 2018; Chaplot et al., 2010). Factores climáticos como la precipitación y humedad ambiental, así como la presencia de organismos que fijan carbono en las capas superiores del suelo, los restos vegetales que se incorporan en la superficie, la presencia de sistemas radiculares de la vegetación influye de manera significativa en la mayor presencia de COS en las capas superiores en comparación a los demás horizontes.

Es importante mencionar que la distribución del COS obedece un comportamiento influenciado por una combinación de diversos factores, entre ellos la altitud, factores climáticos (temperatura y precipitación), relieve topográfico, pendiente, litología del suelo,

el contenido de limo y arcilla, entrada de carbono por restos vegetales, mineralización microbiana, oclusión por agregados, intensidad del pastoreo, tal como lo mencionan diversos autores (Yang et al., 2020; Wiesmeier et al., 2019; Solano et al., 2018; Doetterl et al., 2015; Buytaert et al. 2011, Chaplot et al., 2010, Tonneijck et al., 2010). En la Figura 13 se muestra la interpolación espacial del COS en la zona de estudio.

Por otro lado, como parte del desarrollo del modelo empírico, se han elaborado gráficos de dispersión y aplicación de la prueba de correlación lineal de Pearson (Best y Roberts, 1975), la Figura 20 muestra el gráfico de dispersión entre las variables temperatura del aire y COS, se presenta gran variabilidad y un valor para el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) de $-0,31$, con un p -value $> 0,05$, estadísticamente no significativo y una correlación lineal negativa baja. De manera similar, la Figura 21 muestra el gráfico de dispersión entre las variables precipitación y COS, se presenta gran variabilidad y un valor de $r = 0,31$, con un p -value $> 0,05$, estadísticamente no significativo y una correlación lineal positiva baja. Estos resultados son un indicio de que puede existir una alta correlación entre las variables independientes, temperatura y precipitación, debido a que ambas presentan la misma magnitud con diferente signo para el valor de “ r ”.

La gran dispersión de los datos con respecto a una correlación lineal y los bajos valores del coeficiente “ r ”, para ambos casos, probablemente sean debido a la presencia de valores atípicos, así como también a las condiciones naturales muy complejas y difíciles de controlar que influyen en los resultados, sumado a la dificultad de expresar y simplificar el comportamiento de variables naturales en expresiones matemáticas.

Se realizó un análisis similar al previo, en esta ocasión para las variables independientes temperatura y precipitación, un gráfico de dispersión y la prueba de correlación lineal de Pearson, los resultados se presentan en la Figura 22. La dispersión de los datos se ajusta de manera perfecta a una correlación lineal, con un valor para el coeficiente “ r ” igual a la unidad con signo negativo, esto evidencia un alto grado de correlación, tal como lo explica Montero (2016), este es un problema normal que surge entre variables independientes, para solucionarlo se recomienda continuar el análisis con las variables que posean mayor sentido interpretativo y excluir las demás. En este contexto, y teniendo en cuenta que la precipitación no obedece un comportamiento uniforme con respecto a la altitud, así como un comportamiento homogéneo a una escala local del estudio, se considera excluir la

variable precipitación para los análisis posteriores del modelo empírico y continuar con la temperatura del aire y el COS como variables de estudio.

Posteriormente, se realizaron análisis de regresión mediante gráficos de línea ajustada a niveles de confianza para el intervalo de predicción de 95 y 90 %, respectivamente. Mediante este análisis se identificaron dos valores atípicos (outliers), ver Figura 24, se extrajeron estos valores y se analizaron los parámetros estadísticos (coeficiente de determinación ajustado, desviación estándar y suma de cuadrados total) de esta nueva muestra, se continuó con el proceso de extracción de outliers y en paralelo el análisis del comportamiento de los estadísticos, los resultados se presentan en la Figura 25. De acuerdo al comportamiento presentado, se determina que el tamaño adecuado para la muestra es de 24 grados de libertad, es decir, extrayendo solamente los dos primeros outliers detectados, no se justifica la disminución de más grados de libertad por un incremento poco significativo en los parámetros estadísticos analizados.

Teniendo definido el nuevo tamaño de la muestra, con los outliers ya excluidos, se realizó un nuevo análisis de dispersión y se aplicó la prueba de correlación lineal de Pearson entre las variables temperatura del aire y COS, obteniendo los resultados en la Figura 26, una correlación lineal significativa entre la temperatura media y el COS, tanto gráficamente como con el valor del coeficiente “r” de -0,71 y un p-value < 0,05, que va acorde a lo encontrado por Solano et al. (2018) y Yang et al. (2020). Esta correlación negativa se interpreta en el sentido que a medida que los valores de temperatura disminuyen los valores de COS se van incrementando, y ocurre lo mismo de manera inversa.

Continuando con el proceso de estudio, se realizó la construcción de un modelo empírico en base a una regresión lineal, de tal manera que represente la relación entre las variables temperatura del aire y COS, los parámetros estadísticos de la regresión se muestran en la Figura 27. Se presenta un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) moderado, con un valor de 0,482 y un nivel de significancia (p-value) < 0,05, estadísticamente significativo, con lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, esto indica un considerable ajuste del modelo lineal al conjunto de valores observados de COS, se podría decir que la temperatura del aire explica un 48,2 % de la variabilidad de los datos de COS observados a un nivel de confianza del 95 %.

Acorde a la información presentada en la Figura 27, el modelo empírico que representa la relación lineal entre la temperatura del aire y las reservas de COS se presenta en la ecuación (1):

$$COS (t ha^{-1}) = -9,88 * Temperatura (°C) + 98,14 \dots\dots\dots (1)$$

Adicionalmente, se realizó una comparación espacial entre la temperatura media y el COS, los resultados se presentan en la Figura 28. Los valores de COS y temperatura del aire han sido interpolados para toda la microcuenca, donde se observa que a temperaturas bajas le corresponden valores medios y altos de COS, a temperaturas medias le corresponden valores bajos de COS, y a temperaturas más altas le corresponden valores altos de COS, en específico en la parte baja de la zona de estudio. Es importante mencionar que los resultados mostrados pueden estar influenciados por el método de interpolación. El comportamiento del COS en la microcuenca es explicado en parte por la acción compuesta de diversos factores influyentes en el proceso de estabilización del COS, además de la temperatura que es un factor muy influyente, la presencia de vegetación abundante o dispersa, la precipitación, el relieve topográfico, la disponibilidad de agua y nutrientes, la frecuencia de restos vegetales en la superficie, y demás factores que se mencionaron líneas atrás, todos en conjunto gobiernan la cantidad de entrada de carbono hacia el suelo, asimismo, estos factores influyen en la estabilización del COS, ya que generan condiciones en el suelo que favorecen o desfavorecen la descomposición del COS y su rotación hacia otros ecosistemas. Asimismo, en la parte baja de la zona de estudio, en la zona izquierda donde se tienen coloraciones intensas, se observan las temperaturas más altas y asimismo se tienen los valores más altos de COS, esto es explicado por la presencia de los outliers detectados líneas atrás, estos valores atípicos están ubicados en la parte baja y se representan con coloraciones intensas debido a sus elevados valores.

En la Figura 29 se muestra el análisis de parámetros estadísticos en el proceso de validación del modelo empírico, se presentan tres estadísticos, el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Se empleó el método de validación denominado “Repeated k-Fold-Cross-Validation” (Kuhn, 2008). El modelo empírico tiene un comportamiento bastante aceptable de acuerdo a los parámetros evaluados, con valores de R^2 superiores al 50 % para todas las iteraciones realizadas, de igual manera sucede con los parámetros RMSE y MAE, con valores poco fluctuantes entre

11,16 y 12,57 t ha⁻¹ para RMSE y 10,49 a 10,65 t ha⁻¹ para MAE, valores casi constantes a lo largo de todos los valores analizados de “k”.

Como parte final del estudio, se realizaron proyecciones de los valores de COS de acuerdo a dos escenarios futuros de cambio climático (RCP4,5 y RCP8,5). La Figura 30 presenta los valores de temperatura del aire para cada escenario futuro, estos valores sirvieron como datos de entrada (inputs) para calcular los valores futuros de COS (outputs), aplicando el modelo empírico desarrollado en pasos previos. Las líneas de color negro representan el comportamiento histórico y las líneas de color (azul y rojo para cada escenario) representan los valores futuros, las proyecciones del comportamiento de la temperatura hacia el 2100. Se observan fluctuaciones y un aumento considerable de la temperatura progresivamente. Las figuras 31 y 33 muestran los valores de temperatura interpolados para cada punto de muestreo.

Las figuras 32 y 34 presentan las proyecciones de los posibles valores futuros de COS detallado para cada punto de muestreo. La figura 32 muestra el primer periodo futuro entre el 2021-2060, aquí se presentan cuatro valores positivos de COS para los puntos denominados “p19nw.c31”, “p19nw.c32”, “p21se.c34” y “p21se.c35”, tanto para los escenarios RCP4,5 como RCP8,5. Estos puntos están ubicados en la parte alta de la zona de estudio, por arriba de los 4400 m s.n.m. y poseen coberturas vegetales del tipo “Matorral” las dos primeras, y del tipo “Pastizal” las otras dos. Con respecto al segundo periodo futuro entre 2061-2099, la Figura 34 presenta solo dos valores positivos de COS para los puntos denominados “p21se.c34” y “p21se.c35”, esto con respecto al escenario RCP4,5 (barras de color azul), según el escenario RCP8,5 (barras de color rojo) todos los valores de COS presentan valores negativos. Los valores más negativos se presentan en los primeros puntos de muestreo, los cuales pertenecen a la parte baja de la zona de estudio y se corresponden con valores más altos de temperatura, y a medida que disminuye la temperatura (de izquierda a derecha en la figura) los valores de COS se incrementan.

El incremento de temperatura a futuro puede favorecer a un mayor desarrollo de la vegetación, con tiempos más prolongados en el periodo de desarrollo de las plantas, tal como lo menciona Friend et al. (2013). Se podría esperar que este aumento en la vegetación se vea reflejado en mayores ingresos de carbono hacia el suelo, y con ello el incremento de las reservas de COS a futuro, pero lo cierto es que existen otros factores que interactúan en este complejo sistema, como es el caso de los microorganismos presentes en el suelo. FAO

(2017) menciona que el incremento de temperatura favorece una mayor actividad microbiana y con ello la mineralización del carbono orgánico, en consecuencia, una disminución paulatina de las reservas de COS a futuro. Del mismo modo, Wiesmeier et al. (2019) mencionan que las reservas de COS son mayores en zonas más altas con condiciones frías y húmedas, y disminuyen en climas más cálidos y secos.

La temperatura del aire podría ser uno de los factores más preponderantes que gobierna la estabilización del COS en ecosistemas de montaña, como es el caso en la presente investigación. Se recomienda realizar estudios más detallados sobre la estabilización del COS en este tipo de ecosistemas, de esta manera tener una mejor comprensión del comportamiento del COS hacia futuro, y teniendo en cuenta el cambio climático y sus impactos sobre los ecosistemas, cobra mayor relevancia la necesidad de realizar investigaciones en este campo.

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos evidenciar una tendencia negativa de las reservas de COS hacia el 2099, con disminuciones considerables para ambos periodos futuros, donde los valores futuros de COS, en su totalidad, están por debajo de los valores de la línea base de COS, determinando un impacto negativo del cambio climático sobre las reservas de COS en la microcuenca Cojup, esto va acorde a lo que mencionan Jia et al. (2021), Li et al. (2021) y Wang et al. (2022). Al mismo tiempo, existe incertidumbre sobre la respuesta del COS al cambio climático, debido a las complejas interacciones en su estabilización, siendo así difícil de determinar un comportamiento exacto hacia futuro, tal como lo mencionan Doetterl et al. (2015) y Buytaert et al. (2011).

CONCLUSIONES

1. Las reservas totales de COS medidas hasta una profundidad de 40 cm, oscilaron entre 2,3 a 54,3 t ha⁻¹ con un valor medio de 28,8 ± 17,4 t ha⁻¹. Los tipos de textura del suelo encontrados fueron los tipos “franco arenoso”, “arena franca”, “arena”, “franco” y “franco limoso”, con una mayor presencia del primer tipo.
2. A través del análisis estadístico se logró desarrollar un modelo empírico del tipo lineal que relaciona la variable climática temperatura del aire con las reservas de COS, teniendo un valor para el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0,482 y un nivel de significancia (p-value) < 0,05, rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa, se podría concluir que la temperatura del aire explica un 48,2 % de la variabilidad de los datos de COS observados en la microcuenca Cojup a un nivel de confianza del 95 %.
3. De acuerdo a las proyecciones futuras de temperatura del aire entre el periodo 2021-2099, para los escenarios futuros de cambio climático RCP4,5 y RCP8,5, se logró proyectar los valores futuros de COS para cada punto de muestreo en la zona de estudio, presentándose en su totalidad grandes disminuciones de las reservas de COS. De acuerdo a esta tendencia negativa, se determinó un impacto negativo del cambio climático sobre las reservas de COS en la microcuenca Cojup.

RECOMENDACIONES

1. Cuantificar el contenido de COS mediante otros métodos de mayor precisión, por ejemplo, usando un analizador elemental como equipo de medición para disminuir el grado de error y obtener valores más cercanos a la realidad.
2. Cuantificar el contenido de COS en diferentes tiempos, elaborar un registro histórico y evaluar la tendencia del carbono orgánico del suelo en el tiempo.
3. Realizar un análisis estadístico multivariado, y así incluir en el análisis de los resultados la influencia de múltiples variables sobre las reservas de COS.
4. Realizar la recolección de datos climáticos (precipitación y temperatura) en la zona de estudio, es decir, utilizar equipos in situ y obtener datos observados para así mejorar la exactitud de los datos y disminuir el grado de error en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala Niño, F., Maya Delgado Y. y Troyo Diéguez E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana* 36: 93-104. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Baldocchi, D., Ryu, Y. & Keenan, T. (2016). Terrestrial Carbon Cycle Variability. Issue 5
- Best D. J. & Roberts D. E. (1975). Algorithm AS 89: The Upper Tail Probabilities of Spearman's rho. *Applied Statistics*, 24, 377–379. <https://doi:10.2307/2347111>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* 20, 19–33. <https://doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Brito, J., I. Rojas y R. Roberti. (1990). Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencias. FONAIAP-CENIAP-MARACAY. 164 p.
- Carrasco, F., Casassa, G., Pizarro, R., Saravia, M. (2011). Impactos del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo en las Regiones Montañosas de América Latina. Conference: Iniciativa Estratégica sobre los Impactos del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo en las Regiones de Montañas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2926.6804>
- Chambers, J. M. (1992) Linear models. Chapter 4 of *Statistical Models in S* eds J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Chaplot, V., Bouahom, B., Valentin, C. (2010). Soil organic carbon stocks in Laos: Spatial variations and controlling factors. *Global Change Biology* 16, 1380–1393. <https://doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02013.x>

Chenu, C., Stotzky, G., Huang, P., Bollag, J. (2002). Interactions between microorganisms and soil particles: an overview, in: Interactions between Soil Particles and Microorganisms: Impact on the Terrestrial Ecosystem. pp. 1–40.

Chou, S.C, Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P. and Marengo, J. (2014a). Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. American Journal of Climate Change, 3, 438-454.
<https://doi:10.4236/ajcc.2014.35039>
http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IVik
[o](#)

Chou, S.C, Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G. and Marengo, J. (2014b). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. American Journal of Climate Change,3, 512-527. <https://doi:10.4236/ajcc.2014.35043> .
http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVik
[p](#)

Copernicus Climate Change Service (03 de marzo de 2022). What is bias correction. Recuperado el 03 de marzo de 2022 de <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet7.pdf>

Doetterl, S., Berhe, A. A., Arnold, C., Bodé, S., Fiener, P., Finke, P., Fuchslueger, L., Griepentrog, M., Harden, J. W., Nadeu, E., Schnecker, J., Six, J., Trumbore, S., Van, O. K., Vogel, C., Boeckx, P. (2018). Links among warming, carbon and microbial dynamics mediated by soil mineral weathering. Nature Geoscience. SP – 589. EP – 593. VL - 11. IS – 8. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0168-7>

- Doetterl, S., Stevens, A., Six, J. et al. (2015). Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. *Nature Geosci* 8, 780–783.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2516>
- EPA (2023). *Impacts of Climate Change*. United States Environmental Protection Agency.
Recuperado el 19 de enero de 2023 de <https://www.epa.gov/climatechange-science/impacts-climate-change>
- FAO (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia
- FAO & GTIS. (2015). *Status of the World's Soil Resources*, Roma: s.n.
- Friend Andrew D., Wolfgang Lucht, Tim T. Rademacher, Rozenn Keribin, Richard Betts, Patricia Cadule, Philippe Ciais, Douglas B. Clark, Rutger Dankers, Pete D. Falloon, Akihiko Ito, Ron Kahana, Axel Kleidon, Mark R. Lomas, Kazuya Nishina, Sebastian Ostberg, Ryan Pavlick, Philippe Peylin, Sibyll Schaphoff, Nicolas Vuichard, Lila Warszawski, Andy Wiltshire, Woodward F. (2013). Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *PNAS* vol. 111 no. 9. 3280–3285.
www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1222477110
- Gougoulias, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94: 2362-2371.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2019). ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to

present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

<https://doi:10.24381/cds.6860a573>

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (2018). Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.

INAIGEM. (2016). Informe de inspección: Identificación y georreferenciación de áreas de investigación en la microcuenca Cojup. Huaraz.

INAIGEM. (2019). Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña en el Perú 2018.

IPCC. (2019). Resumen para responsables de políticas. El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres.

IPCC. (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)]. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930.
<https://doi:10.1017/9781009325844.029>.

Jia, H.X., Wang, X., Xiao, J.J., Jang, S.L., Li, J., Zhao, Y.F., Ye, W.L. Simulated soil organic carbon stocks in northern China's cropland under different climate change

- scenarios. (2021). *Soil and Tillage Research*, Volume 213, 105088, ISSN 0167-1987.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105088>
- Kane, D. (2015). *Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices*, s.l.: s.n.
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677): 1623-1627
- Lehmann, J. & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580): 60-68.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., ..., Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8: 605-649.
- Li, H., Wu, Y., Chen, J., Zhao, F., Wang, F., Sun, Y., Zhang, G., Qiu, L. (2021). Responses of soil organic carbon to climate change in the Qilian Mountains and its future projection. *Journal of Hydrology*. Volume 596. 126110, ISSN 0022-1694.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126110>.
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C.P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., Giarolla, A. (2017). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>

- MINAM. (2015). Guía de valoración económica del patrimonio natural. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., ..., Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Ministerio del Ambiente - Dirección General de Calidad Ambiental. (2014). Guía para el Muestreo de Suelos.
- Montero Granados R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
- O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M. & Mcbratney, A. B. (2015). Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21: 3561–3574.
- Qin, Yun & Ren, Guoyu & Zhai, Tianlin & Zhang, Panfeng & Wen, Kangmin. (2018). A New Methodology for Estimating the Surface Temperature Lapse Rate Based on Grid Data and Its Application in China. *Remote Sensing*. <https://doi:10.1617.10.3390/rs10101617>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rolando, J.L., Dubeux, J.C., Perez, W., Ramirez, D.A., Turin, C., Ruiz-Moreno, M., Comerford, N.B., Mares, V., Garcia, S., Quiroz, R. (2017). Soil organic carbon stocks and fractionation under different land uses in the Peruvian high-Andean Puna. *Geoderma* 307, 65–72. <https://doi:10.1016/j.geoderma.2017.07.037>

- Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. 1. ed. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 79 p.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. & E. Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49–56.
- Schrumpf, M., Kaiser, K., Guggenberger, G., Persson, T., Kögel-Knabner, I., Schulze, E.-D., (2013). Storage and stability of organic carbon in soils as related to depth, occlusion within aggregates, and attachment to minerals. *Biogeosciences* 10, 1675 – 1691. <https://doi:10.5194/bg-10-1675-2013>
- SENAMHI. (2020). Guía Técnica para Aplicativo Web Tendencias Históricas - TENDHIS.
- SENAMHI. (2020). Promedio de temperatura normal para HUARAZ. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0013>
- Solano M., Ramón P., Guzmán-M E., Burneo J. I., Quichimbo P., Jiménez L. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas de carbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Ecosistemas* 27(3): 116-122 <https://doi:10.7818/ECOS.1521>
- Thomson A. M., Calvin K. V., Smith S. J., Kyle G. P., Volke A., Patel P., Delgado-Arias S., Bond-Lamberty B., Wise M. A., Clarke L. E., Edmonds J. A. (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* (2011) 109:77–94. <https://doi:10.1007/s10584-011-0151-4>
- Tonneijck, F.H., Jansen, B., Nierop, K.G.J., Verstraten, J.M., Sevink, J., De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash

- soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science* 61, 392–405. <https://doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- UN (2023). What Is Climate Change?. United Nations, Climate Actions. Recuperado el 19 de enero de 2023 de <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- Van der Wal, A. & De Boer, W. (2017). Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 105: 45-48.
- Wang, B., Gray, J. M., Waters, C. M., Anwar, M. R., Orgill, S. E., Cowie, A. L., Feng, P., Liu, D. L. (2022). Modelling and mapping soil organic carbon stocks under future climate change in south-eastern Australia. *Geoderma*, Volume 405, 115442, ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115442>.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.J., Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333, 149–162. <https://doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Yang, S. (2020). Soil organic matter in the Peruvian Andes: Unravelling factors controlling soil organic carbon distribution and the underlying organic matter stabilization mechanisms.
- Yang, S., Cammeraat, E., Jansen, B., den Hann, M., van Loon, E., Recharte, J. (2018). Soil organic carbon stocks controlled by lithology and soil depth in a Peruvian alpine grassland of the Andes. *Catena* 171, 11–21. <https://doi:10.1016/j.catena.2018.06.038>
- Yang, S., Jansen, B., Absalah, S., van Hall, R. L., Kalbitz, K., Cammeraat, E. L. H. (2020). Lithology- and climate-controlled soil aggregate-size distribution and organic carbon stability in the Peruvian Andes, *SOIL*, 6, 1–15. <https://doi.org/10.5194/soil-6-1-2020>.

ANEXOS

Anexo 1: Protocolo para la determinación de carbono orgánico del suelo

1. Conceptualización del estudio

1.1. Objetivo

Determinar la cantidad de carbono orgánico total y el tipo de textura, en muestras de suelo recolectadas a lo largo de la microcuenca Cojup.

1.1.1. Objetivos específicos

- Recolectar 252 muestras de suelo, distribuidas en 07 sectores, 21 puntos de muestreo y 35 calicatas.
- Cuantificar el contenido de carbono orgánico total en 176 muestras de suelo.
- Determinar el tipo de textura en 20 muestras de suelo.
- Determinar la densidad aparente en 56 muestras de suelo.

1.2. Límites y acceso al área de estudio

El área de estudio comprende la extensión de la microcuenca Cojup, que cuenta con un gradiente altitudinal entre los 3811 – 4556 msnm, un área aproximada de 52 km² y pertenece a la Subcuenca del río Quillcay, Cuenca del santa, ubicada en el departamento de Áncash (INAIGEM, 2016).

1.3. Sectores del área de estudio

La sectorización de la microcuenca Cojup se realiza para dividir los sitios heterogéneos presentes a lo largo de la quebrada, donde cada sector se considera un área más pequeña de muestreo, estas son zonas relativamente homogéneas en términos ecológicos (altitud, microclima, tipo y uso del suelo, cobertura vegetal y estado de conservación, etc.), que están ligados e influyen en la cantidad de carbono orgánico presente en el suelo.

De esta forma se determinan puntos de muestreo que maximicen el rango geofísico y las variables ambientales dentro del área, se reduce la cantidad de muestras, y se aumenta la exactitud y precisión del muestreo.

Es así que, la designación de sectores se basa fundamentalmente en el gradiente de altitud que posee la quebrada, resultando así 07 sectores con altitudes aproximadas de 3800, 3950, 4100, 4200, 4300, 4400 y 4500 m s.n.m. respectivamente. Asimismo, dentro de cada sector se consideran 03 distribuciones, una en la parte central para evaluar la presencia de detritos de origen aluvial y su influencia en los parámetros físicos del suelo, y dos zonas en ambos márgenes del río, teniendo en cuenta el tipo de cobertura del suelo y la ausencia de detritos de origen aluvial.

Dentro de cada sector se designan 03 puntos de muestreo y 05 calicatas, distribuidos entre ambos márgenes del río (margen derecho e izquierdo), y teniendo en cuenta la cobertura del suelo (pastizales, bosque de polylepis, matorrales y zonas de deslizamiento) y la pendiente del terreno (muy probable factor influyente en la cantidad de humedad del suelo), ver Figura 35.

1.4. Determinación del tipo, cantidad y la ubicación de las parcelas para la medición

Determinar la cantidad mínima de parcelas necesarias, que garanticen la exactitud del estudio, sirve para disminuir el costo de la medición en campo. Como tal, el diseño de las parcelas se realiza teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, el grado de exactitud, la eficiencia del muestreo y la seguridad.

1.4.1. Tipo de parcelas

Para evaluar las existencias de carbono se pueden utilizar dos tipos de parcelas: permanentes y temporales (Howard et al., 2018). Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas para cada tipo de parcela, y las condiciones del área de estudio, se usan parcelas temporales.

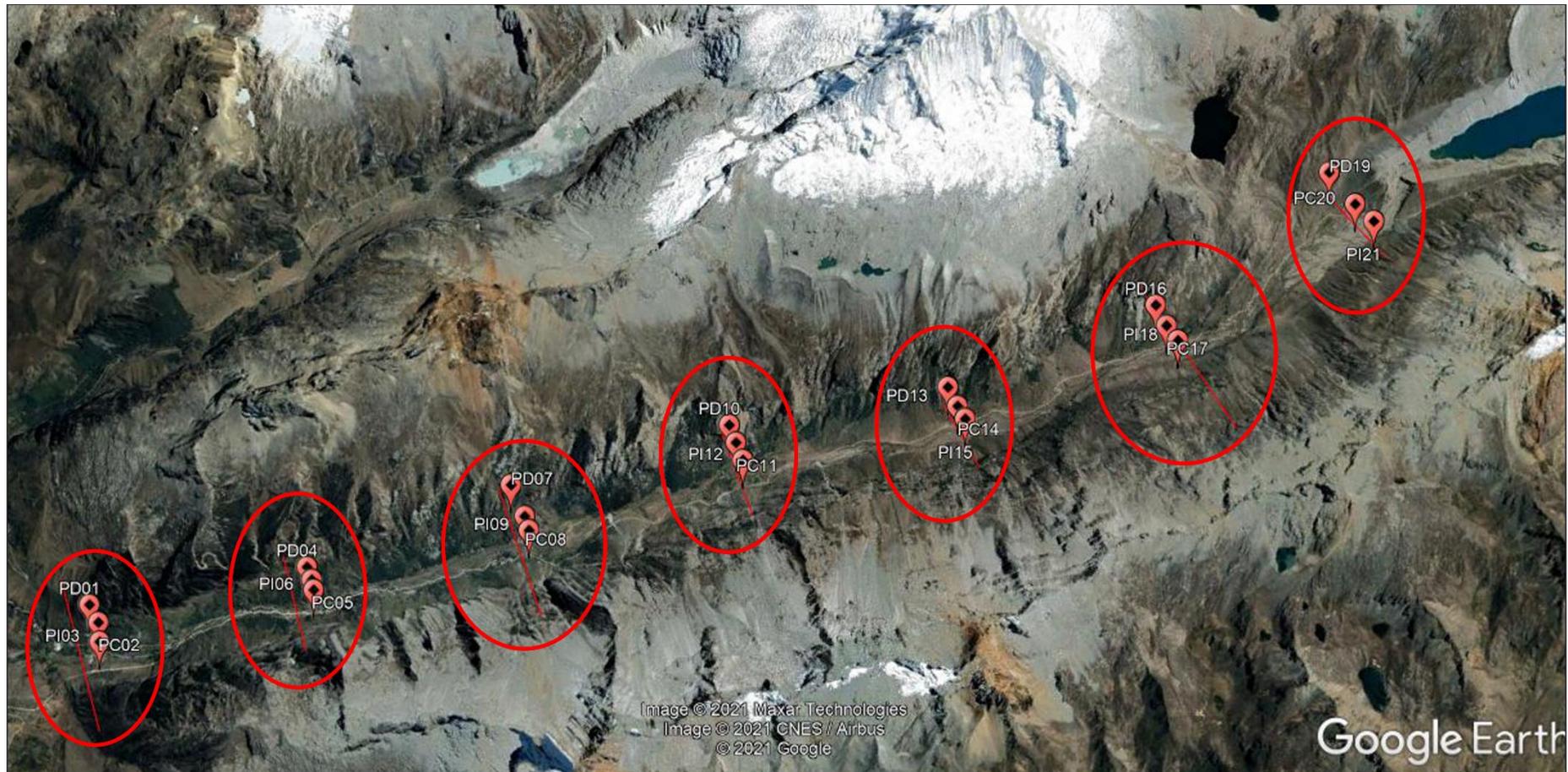


Figura 35. Ubicación de los puntos de muestreo en la zona de estudio (divididos en 7 sectores, 21 puntos de muestreo y 35 calicatas). Figura tomada de Google Earth.

1.4.2. Cantidad de parcelas

La cantidad óptima de parcelas depende del nivel de certeza estadística deseado, la variabilidad inherente del carbono entre las parcelas dentro de un mismo sector y el costo asociado al muestreo. Pearson et al. (2007) presenta un método para determinar el número de parcelas en función de la variación conocida en cada sector, es decir, con estimaciones del carbono existente en el área de estudio (Howard et al., 2018).

Caso contrario, de no contar con datos previos en la zona de estudio, se recomienda tomar el mayor número de muestras que sean posibles, según el presupuesto y el tiempo disponible.

En el presente estudio se establecen 3 parcelas o puntos de muestreo por cada sector, dentro de cada punto de muestreo se realizan las calicatas a lo largo de toda la microcuenca, ver Figura 36.

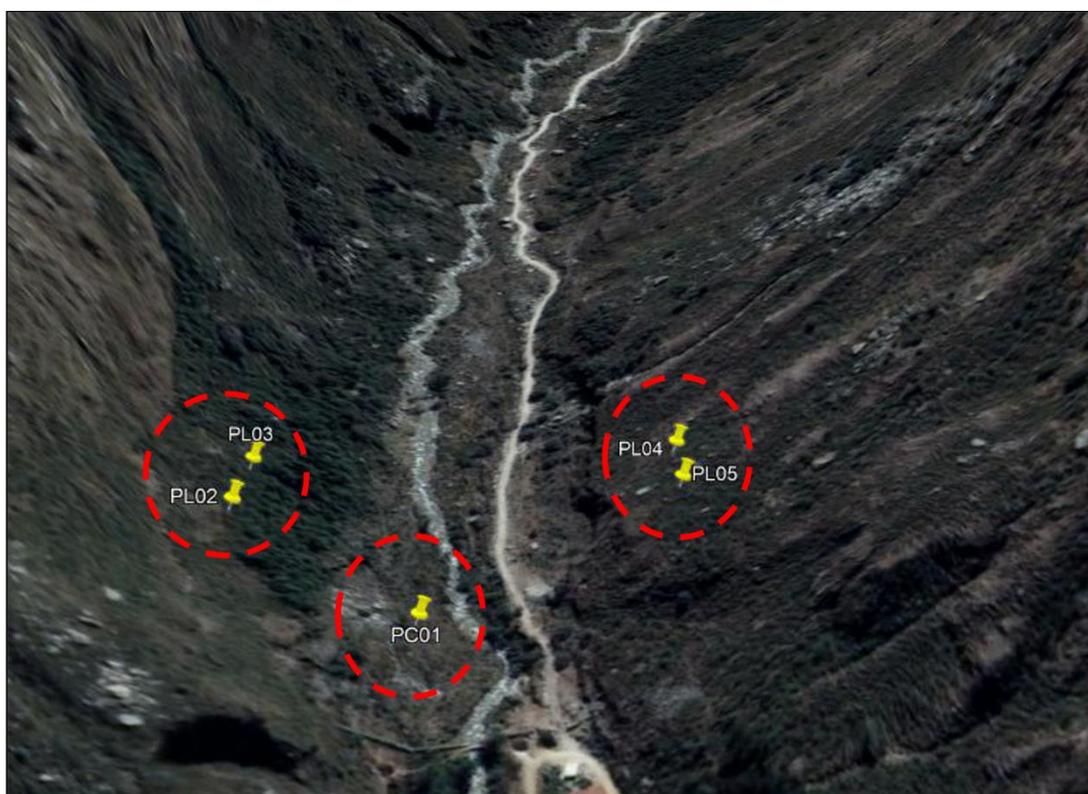


Figura 36. Ubicación de las parcelas y calicatas (zona central y en los márgenes del río). Figura tomada de Google Earth.

1.4.3. Ubicación de las parcelas

La ubicación de las parcelas minimiza los disturbios del ecosistema y la variación dentro de los estratos. Los métodos más recomendados para determinar la ubicación de las parcelas son el método aleatorio y el método de cuadrícula basada en probabilidades (Howard et al., 2018).

Teniendo en cuenta los objetivos del estudio, los sectores, el tipo de cobertura vegetal presente, el gradiente altitudinal, las unidades geológicas características de la zona, y la accesibilidad a la ubicación de cada parcela, se tienen las siguientes ubicaciones para las calicatas de muestreo, ver tabla 4.

Tabla 4

Información de los puntos de muestreo

Ítem	Código calicatas de muestreo	Altitud (msnm)	Coordenadas UTM WGS84		Observación
			Este	Norte	
1	P1NW.C1	3786	230581,5	8950775,5	Matorral
2	P1NW.C2	3786	230587,6	8950775,6	Matorral
3	P2C.C3	3750	230630,7	8950711,3	Zona de deslizamiento
4	P3SE.C4	3918	230664,5	8950677,7	Matorral
5	P3SE.C5	3864	230652,4	8950671,5	Matorral
6	P4NW.C6	3998	232202	8952272	Matorral
7	P4NW.C7	3998	232241	8952266	Matorral
8	P5C.C8	3930	232193	8952173	Zona de deslizamiento
9	P6SE.C9	3949	232249	8952111	Matorral
10	P6SE.C10	4102	232228	8952102	Matorral
11	P7NW.C11	4102	233487	8953522	Matorral
12	P7NW.C12	4099	233487	8953522	Matorral
13	P8C.C13	4062	233578	8953481	Zona de deslizamiento

14	P9SE.C14	4110	233601	8953399	Matorral
15	P9SE.C15	4187	233613	8953384	Matorral
16	P10NW.C16	4189	234460	8954894	Matorral
17	P10NW.C17	4169	234477,6	8954869,6	Matorral
18	P11C.C18	4132	234578,6	8954824,2	Zona de deslizamiento
19	P12SE.C19	4169	234676,9	8954735,7	Matorral
20	P12SE.C20	4279	234679,9	8954741,9	Matorral
21	P13NW.C21	4276	235846	8956138	Matorral
22	P13NW.C22	4256	235849	8956146	Matorral
23	P14C.C23	4229	236004	8956060	Zona de deslizamiento
24	P15SE.C24	4255	236139	8955926	Pastizal
25	P15SE.C25	4328	236139	8955926	Pastizal
26	P16NW.C26	4312	237089	8957579	Pastizal
27	P16NW.C27	4321	237166	8957605,3	Matorral
28	P17C.C28	4305	237249	8957529,1	Zona de deslizamiento
29	P18SE.C29	4319	237288	8957415	Matorral
30	P18SE.C30	4337	237264,9	8957433,9	Matorral
31	P19NW.C31	4434	237754	8959305	Matorral
32	P19NW.C32	4458	237758	8959307	Matorral
33	P20C.C33	4413	238118	8959108	Zona de deslizamiento
34	P21SE.C34	4515	238261	8959054	Pastizal
35	P21SE.C35	4507	238264	8959060	Pastizal

1.4.4. Forma y tamaño de las parcelas

Existen diversos tamaños y formas de parcelas que pueden describir el contenido de carbono presente en el suelo. La elección de esta gira en torno al grado de precisión deseado, la

variabilidad de las existencias de carbono, el tiempo y los recursos disponibles para realizar el estudio. Por todo lo mencionado, el presente estudio trabaja con parcelas circulares de dimensiones de 1 metro de radio, ver Figura 37 (Rügnitz et al., 2009).

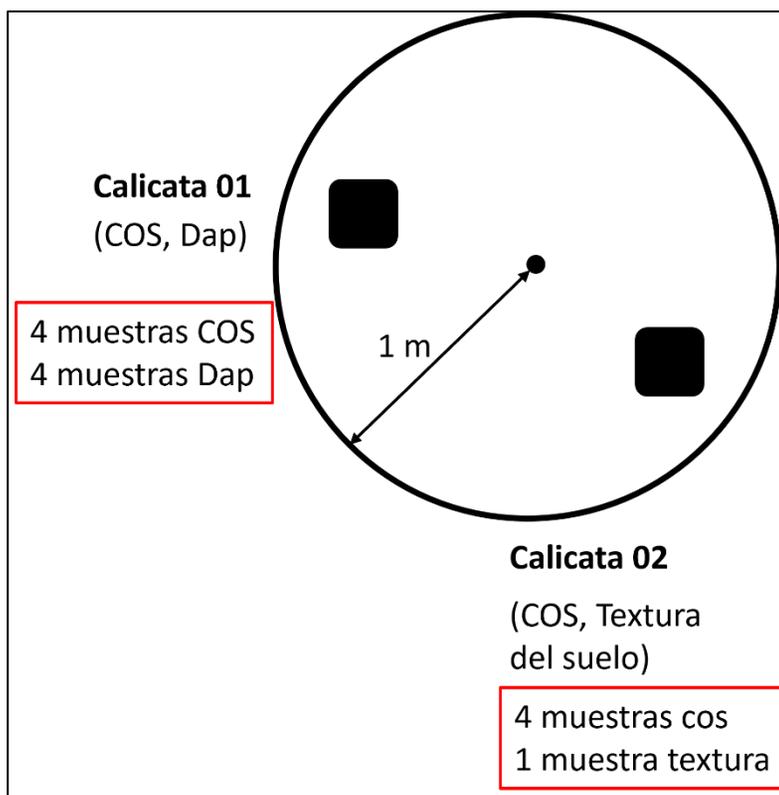


Figura 37. Diseño de parcela para muestreo de suelo. Adaptado de Rügnitz et al. (2009)

1.5. Frecuencia de medición

La frecuencia necesaria para evaluar las existencias de carbono depende de los objetivos del estudio y del sumidero que se desea medir, por ejemplo, la biomasa aérea presenta mayor variabilidad en comparación al carbono de los suelos, además, los patrones estacionales de crecimiento y muerte oscilan a lo largo del año (con picos en la biomasa aérea, por lo general a fines del verano).

En este contexto, debido a los objetivos del estudio y teniendo en cuenta la coyuntura nacional se realiza un único muestreo.

2. Método para el muestreo de suelo en campo

Entre las principales formas para realizar muestreo de suelos en campo, están el establecimiento de calicatas y el uso de barrenos. Como la abertura de calicatas representa un esfuerzo mayor y demanda más tiempo, se recomienda la utilización del barreno, o incluso, la combinación de ambas técnicas según la situación lo amerite.

Para determinar el contenido de carbono en el suelo se cuantifican y establecen diferentes parámetros como, el nivel de profundidad para tomar las muestras, la densidad aparente del suelo, y el contenido de carbono orgánico. A continuación, se detallan los procedimientos para cada uno.

2.1. Profundidad del muestreo

La profundidad del muestro depende de las condiciones del área, y profundidad prevista en que ocurrirán cambios en el stock de carbono del suelo. Generalmente, las concentraciones de carbono orgánico del suelo son más altas en la capa superior y disminuyen exponencialmente con la profundidad (Rügnitz et al., 2009).

Además, teniendo en cuenta los objetivos del estudio, se prioriza abarcar la mayor distribución espacial posible, para intentar representar de forma efectiva los procesos que involucran la dinámica del carbono en el suelo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se toman muestras del suelo para dos zonas diferentes, la primera para zonas no perturbadas por eventos de origen aluviónico (zonas ubicadas en los márgenes derecho e izquierdo del cauce del río), y la segunda para zonas que sí han sufrido perturbación por eventos aluviónicos (zonas ubicadas en la parte central de la quebrada, en las zonas más bajas). La profundidad del muestreo en la primera zona es de 40 cm, dividido en 4 horizontes cada 10 cm (0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm) y para la segunda zona una profundidad de 90 cm, dividido en 10 horizontes de 10 cm cada uno (0-10, 10-20, ..., 80-90 cm).

2.2. Colecta de muestras para medición de carbono orgánico del suelo

En cada parcela de muestreo se procede de la siguiente manera:

- Construcción de la calicata y marcación de las profundidades a ser muestreadas,
- Recolección de 3 muestras de suelo para cada intervalo de profundidad, utilizando un martillo y un cilindro metálico de volumen conocido (o barreno),
- Las muestras se homogenizan en un mismo recipiente y de estas se extrae una muestra compuesta (1 kg aproximadamente) que será depositada en una bolsa ziploc codificada.

En total se obtiene 1 muestra por cada nivel de profundidad, 4 muestras por cada calicata y 8 muestras en total por cada parcela, equivalente a 8 kg aproximadamente, ver Figura 37.

2.3. Colecta de muestras para medición de la densidad aparente del suelo

Es necesario medir la densidad aparente del suelo a cada nivel de profundidad y en cada parcela.

El muestreo inicia de la siguiente manera:

- Marcación de las profundidades a ser muestreadas,
- Con la ayuda de un martillo se introducen cilindros metálicos de volumen conocido (965 cm^3) y se extrae la muestra del suelo sin destruir el material,
- En el caso de las parcelas centrales se realiza el cálculo de la densidad aparente por el método de volumetría de líquidos, se realiza un orificio en el suelo y se introduce volúmenes conocidos de agua hasta cubrir el orificio, se registra el volumen de agua utilizado, siendo necesario realizar el procedimiento una sola vez para toda la calicata,
- Finalmente, las muestras se depositan en bolsas ziploc codificadas.

En total se obtiene 1 muestra por cada nivel de profundidad, 4 muestras por cada calicata y 4 muestras en total por cada parcela lateral, equivalente al volumen aproximado de 2895 cm^3 , ver Figura 37. Para las parcelas centrales se obtiene 1 muestra por cada calicata.

2.4. Colecta de muestras para medición de textura del suelo

Se realiza la colecta de muestras de suelo para determinar la textura del suelo presente en cada parcela de muestreo.

- Dentro de cada parcela se selecciona un punto de muestreo (de acuerdo a la Figura 37) y se extrae una muestra del suelo en cada intervalo de profundidad (con ayuda del barreno o cilindro de volumen conocido).
- Las muestras se homogenizan en un mismo recipiente y de estas se extrae una muestra compuesta (1 kg aproximadamente) que será depositada en una bolsa ziploc codificada.

En total se obtiene 1 muestra (1 kg) por cada parcela de muestreo, ver Figura 37.

2.5. Materiales y herramientas para la medición de carbono orgánico y de raíces finas

Los materiales usados comúnmente para el levantamiento de información para la evaluación de carbono del suelo son los siguientes, ver tabla 5.

Tabla 5

Herramientas para la medición de carbono orgánico del suelo

Materiales y Herramientas	Utilidad
Mapas, geoposicionador (GPS)	Orientar la localización de las parcelas.
Libreta de apuntes y ficha de datos de campo	Tomar datos relevantes para el muestreo
Marcadores permanentes	Identificar las bolsas ziploc
Bolsas ziploc	Contener la muestra recolectada
Masking tape	Rotular las bolsas ziploc
Clinómetro	Medir la pendiente del suelo
Wincha de 5 m	Medir las dimensiones de la parcela
Balanza portátil	Pesar las muestras de suelo
Pala cuadrangular y pico	Para realizar las calicatas
Cuchillo y tijera de podar	Auxiliares para el muestreo
Cilindros para muestras del suelo (barreno) y martillo	Extraer las muestras de suelo sin dañar el material.
Estacas de madera	Delimitar las parcelas
Carpa impermeable	Evitar perder muestras debido a lluvias inesperadas
Balde (10 – 15 L)	Homogenizar las muestras
Cooler (15 L)	Almacenamiento de muestras
Ice pack (4)	Mantener las muestras refrigeradas
Bolsas plásticas	Almacenar los desechos
Papel aluminio (8m)	Fabricar contenedores para introducir las muestras en la estufa

Colador metálico
Tablas y taco de madera

Tamizar la muestra
Auxiliares para extraer la muestra

2.6. Rotulado de las muestras de suelo y almacenamiento

Etiquetar adecuadamente los contenedores de las muestras (bolsas ziploc) es fundamental para evitar confusiones y errores comunes en la identificación de estas. Cada bolsa ziploc debe tener una etiqueta con al menos la identificación de la parcela (punto de muestreo), el número de la calicata dentro de la parcela, el parámetro que se mide y el intervalo de profundidad.

De acuerdo a la distribución de las parcelas, los parámetros a medir, y los niveles de profundidad, se tiene lo siguiente:

- Tipos de parcela: se tienen dos tipos de parcelas, las parcelas laterales y las parcelas centrales, identificadas con las abreviaturas PD, PI y PC, parcela derecha, parcela izquierda y parcela central, respectivamente.
- Dentro de cada parcela se tienen 02 calicatas de muestreo, la Figura 03 detalla los parámetros que se miden en cada uno de estos.
- A cada punto le corresponde un parámetro físico del suelo (COS, DAp, y textura del suelo).
- Finalmente, en cada calicata se toman muestras a diferente nivel; en las parcelas laterales se toman a un nivel de profundidad de 40 cm, teniendo así 4 niveles cada 10cm (0-10, 10-20 y 20-30 cm), y para las parcelas centrales, el nivel de profundidad es de 90 cm, resultando 9 niveles cada 10 cm.

Se presentan 3 ejemplos para un adecuado archivo de las muestras:

PD04-C07-COS30 PC02-C03-TEXTURA PI21-C34-DAP40

Donde:

PD04, PC02, PI21: Parcela derecha 04, parcela central 02 y parcela izquierda 21,

C07, C03, C34: calicata 07, calicata 03 y calicata 34,

COS30: muestra para determinar carbono orgánico del suelo al nivel de 20 a 30 cm,

TEXTURA: muestra para determinar la textura del suelo,

DAP40: muestra para determinar la Densidad aparente del suelo al nivel de 30 a 40 cm.

Finalmente, por cada parcela del tipo:

- Lateral: se tienen 13 muestras en total, 8 muestras para el parámetro de carbono orgánico del suelo, 4 muestras para determinar densidad aparente del suelo y 1 muestra para determinar la textura del suelo, y;
- Central: se tienen 11 muestras en total, 9 muestras para el parámetro de carbono orgánico del suelo, 1 muestra para determinar densidad aparente del suelo y 1 muestra para determinar la textura del suelo.

Para minimizar la descomposición de la materia orgánica, las muestras se conservan frías (entre 4 - 7 °C) y, de ser posible, congeladas antes de que transcurran 24 horas de la recolección. Para tal motivo, las muestras recolectadas en campo se almacenan junto a paquetes de ice pack, dentro de un cooler de material plástico poliuretano.

3. Preparación de la muestra y análisis en laboratorio

La determinación del contenido de carbono en el suelo se realiza mediante dos parámetros medidos en campo: densidad aparente del suelo y contenido de carbono orgánico determinado por el laboratorio. A continuación, se detallan los procedimientos.

3.1. Determinación de la densidad aparente del suelo (DAp)

Se determina a partir de la masa del material completamente seco y su volumen original, mediante la siguiente fórmula.

$$DAp \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa de suelo seco (g)}}{\text{volumen original de la muestra (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

DAp: Densidad aparente del suelo

3.1.1. Determinación del volumen original de la muestra

El volumen original de la muestra se determina en base al volumen de los cilindros metálicos utilizados para la extracción de las muestras. El volumen se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = \pi * r^2(\text{cm}^2) * h (\text{cm})$$

Donde:

r equivale al radio del cilindro metálico

h a la altura del mismo

3.1.2. Determinación de la masa seca

Las muestras de suelo codificadas para determinar densidad aparente del suelo son transportadas al laboratorio de la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) y llevan el siguiente proceso:

- Colocar la muestra en un recipiente pesado previamente (placa Petri)
- Para el secado, introducir la muestra en un horno a temperatura de 60 °C, la muestra puede esparcirse cuidadosamente en partes pequeñas para reducir el tiempo de secado.
- El secado debe realizarse hasta obtener un peso constante, esto se logra secándola durante al menos 24 horas, dejar enfriar a temperatura ambiente en un desecador durante al menos 1 hora, luego pesar.
- Colocar nuevamente al horno, secarla durante 24 horas y volver a pesarla.
- El ciclo se repite hasta que las diferencias sucesivas de peso sean inferiores al 4 %. Por lo general, este proceso toma entre 48 y 72 horas.

El peso registrado en el último ciclo es la masa de suelo seco, con esta información y el volumen original de la muestra se calcula la densidad aparente del suelo.

3.2. Determinación del contenido de carbono orgánico presente en el suelo

El carbono orgánico en el suelo se puede cuantificar por diferentes métodos de laboratorio, entre ellos se tienen los métodos por oxidación húmeda, combustión seca o pérdida por ignición

(LOI). Cada uno presenta ventajas y desventajas, con lo cual, la elección del método dependerá del grado de precisión que requiere el estudio, la disponibilidad de equipos que utiliza cada método, y/o el presupuesto para contratar el servicio de análisis a un laboratorio.

Para el presente estudio se utiliza el método de oxidación húmeda, conocido como Método de Walkley-Black, el cual consiste en realizar una oxidación incompleta del carbono orgánico contenido en el suelo, con la ayuda de una mezcla oxidante en un medio ácido (Brito et al., 1990).

Las muestras de suelo codificadas para determinar contenido de carbono orgánico se trasladan al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM). Los resultados representan el contenido de carbono orgánico presente en la muestra del suelo llevada a laboratorio (COlab), y junto a otros parámetros se calcula el contenido de carbono orgánico en el suelo.

$$\text{COS} \left(\frac{\text{T C}}{\text{ha}} \right) = \text{COlab} \left(\frac{\text{g C}}{\text{g suelo}} \right) * \text{DAp} \left(\frac{\text{g suelo}}{\text{cm}^3} \right) * \text{prof. (cm)} * \frac{10^8 \text{cm}^2}{1 \text{ha}} * \frac{1 \text{T C}}{10^6 \text{g C}}$$

Donde:

COS: Carbono orgánico presente en el suelo

COlab: Carbono orgánico presente en la muestra de suelo llevada a laboratorio

DAp: Densidad aparente del suelo

Prof.: Profundidad del horizonte muestreado

Anexo II: Muestreo del suelo y trabajo en laboratorio para la determinación de COS



Figura 38. Características de algunos puntos de muestreo en la microcuenca Cojup.



Figura 39. Desarrollo del muestreo de suelos en la zona de estudio – parte 1 (en la izquierda se observa la calicata y en la derecha el pesaje de las muestras)



Figura 40. Desarrollo del muestreo de suelos en la zona de estudio – parte 2 (ubicaciones de las calicatas en la zona de estudio, imagen izquierda ubicada en la parte media, derecha arriba en la parte alta, derecha abajo en la parte baja)

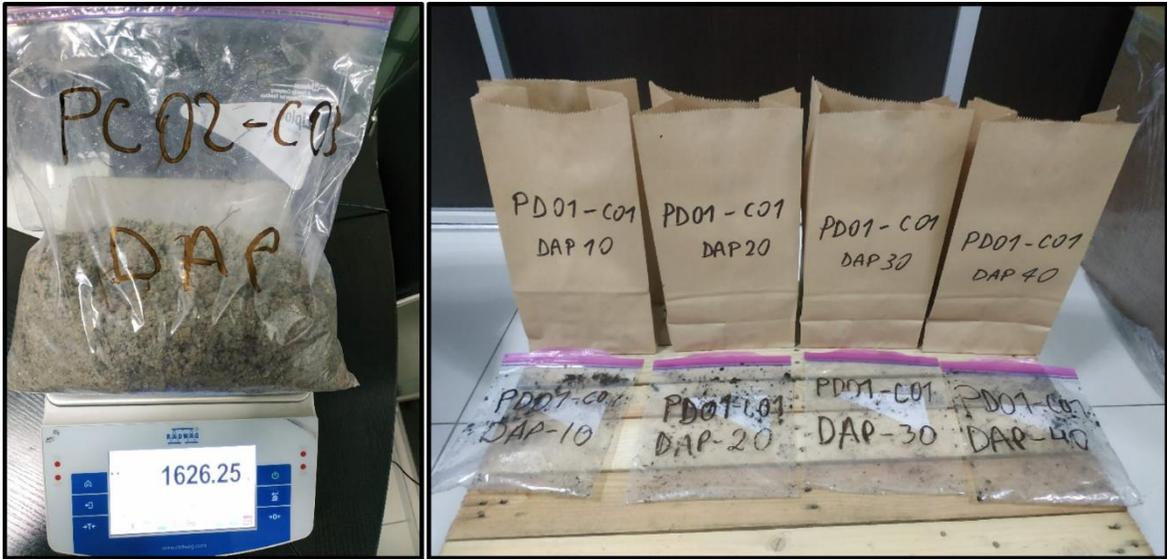


Figura 41. Pesado de muestras y trasvase a bolsas de papel para el secado en la estufa.

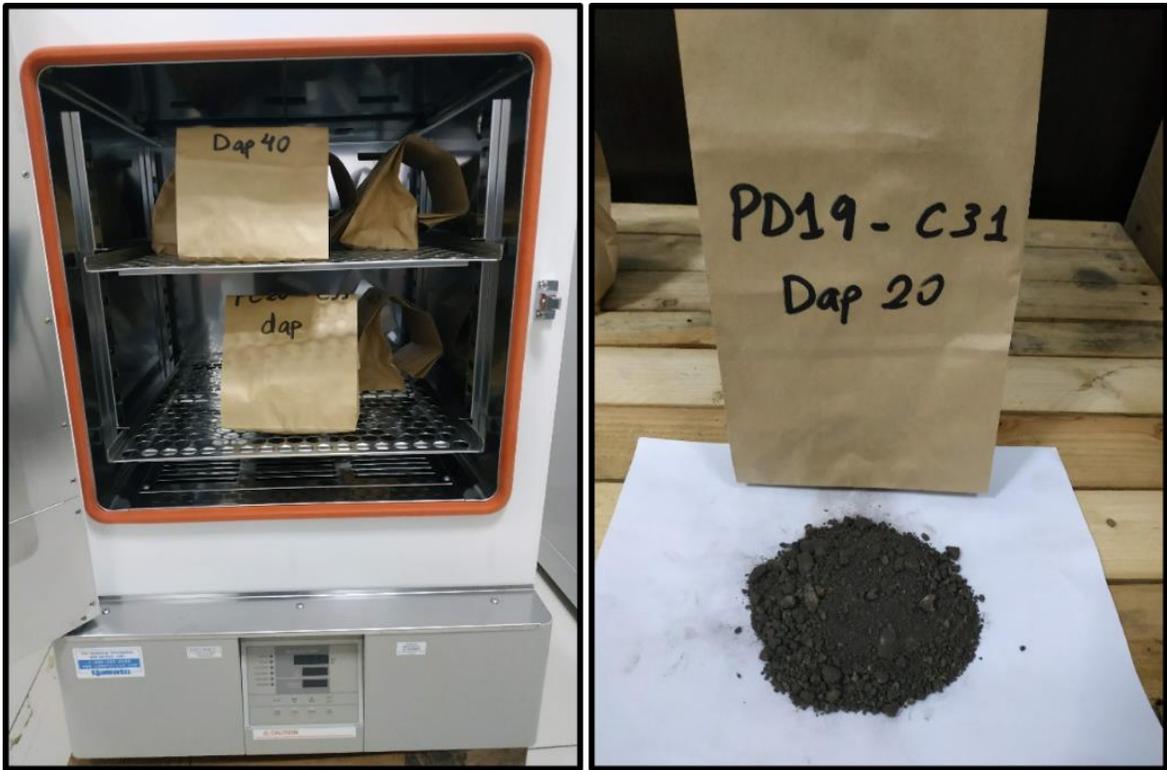


Figura 42. Secado de muestras en la estufa (izquierda) y muestra sin contenido de humedad (derecha).

Anexo III: Resultados de las reservas de COS e información meteorológica de la zona de estudio.

Tabla 6

Resultados de las reservas de COS en la microcuenca Cojup

Punto de muestreo	Profundidad (cm)	Reserva de C (t ha⁻¹)
P1.NW.C1-C2	0-10	14,15
	10-20	14,15
	20-30	13,06
	30-40	11,79
P3.SE.C4	0-10	3,76
	10-20	3,30
	20-30	3,99
	30-40	2,75
P4.NW.C6-C7	0-10	6,86
	10-20	4,45
	20-30	2,40
	30-40	0,81
P6.SE.C9-C10	0-10	6,34
	10-20	4,12
	20-30	2,84
	30-40	0,13
P7.NW.C11-C12	0-10	3,91
	10-20	1,02
	20-30	0,25
	30-40	0,15
P9.SE.C14-C15	0-10	6,84
	10-20	2,56
	20-30	1,68
	30-40	0,31
P10.NW.C16-C17	0-10	5,25
	10-20	2,30
	20-30	2,33

	30-40	1,23
P12.SE.C19-C20	0-10	15,37
	10-20	2,75
	20-30	2,10
	30-40	1,20
P13.NW.C21-C22	0-10	12,74
	10-20	12,97
	20-30	9,58
	30-40	5,58
P15.SE.C24-C25	0-10	11,29
	10-20	10,76
	20-30	9,34
	30-40	7,89
P16.NW.C26-C27	0-10	16,88
	10-20	18,06
	20-30	8,18
	30-40	5,74
P18.SE.C29-C30	0-10	16,61
	10-20	10,98
	20-30	7,37
	30-40	8,00
P19.NW.C31-C32	0-10	13,98
	10-20	11,35
	20-30	11,23
	30-40	13,22
P21.SE.C34-C35	0-10	8,94
	10-20	6,31
	20-30	6,56
	30-40	7,75

Tabla 7*Información de las estaciones meteorológicas*

ESTACIÓN	PARÁMETROS	COORDENADAS UTM WGS84		ALTITUD (msnm)	LOCALIZACIÓN
		Este	Norte		
Palcacocha	Precipitación y temperatura	238048.8	8959747.7	4586	Independencia - Huaraz Áncash
Santiago Antúnez de Mayolo	Precipitación y temperatura	222801.9	8947030.9	3079	Huaraz - Huaraz Áncash

Anexo IV: Reporte del LASPAF con respecto al análisis de carbono orgánico y textura del suelo.

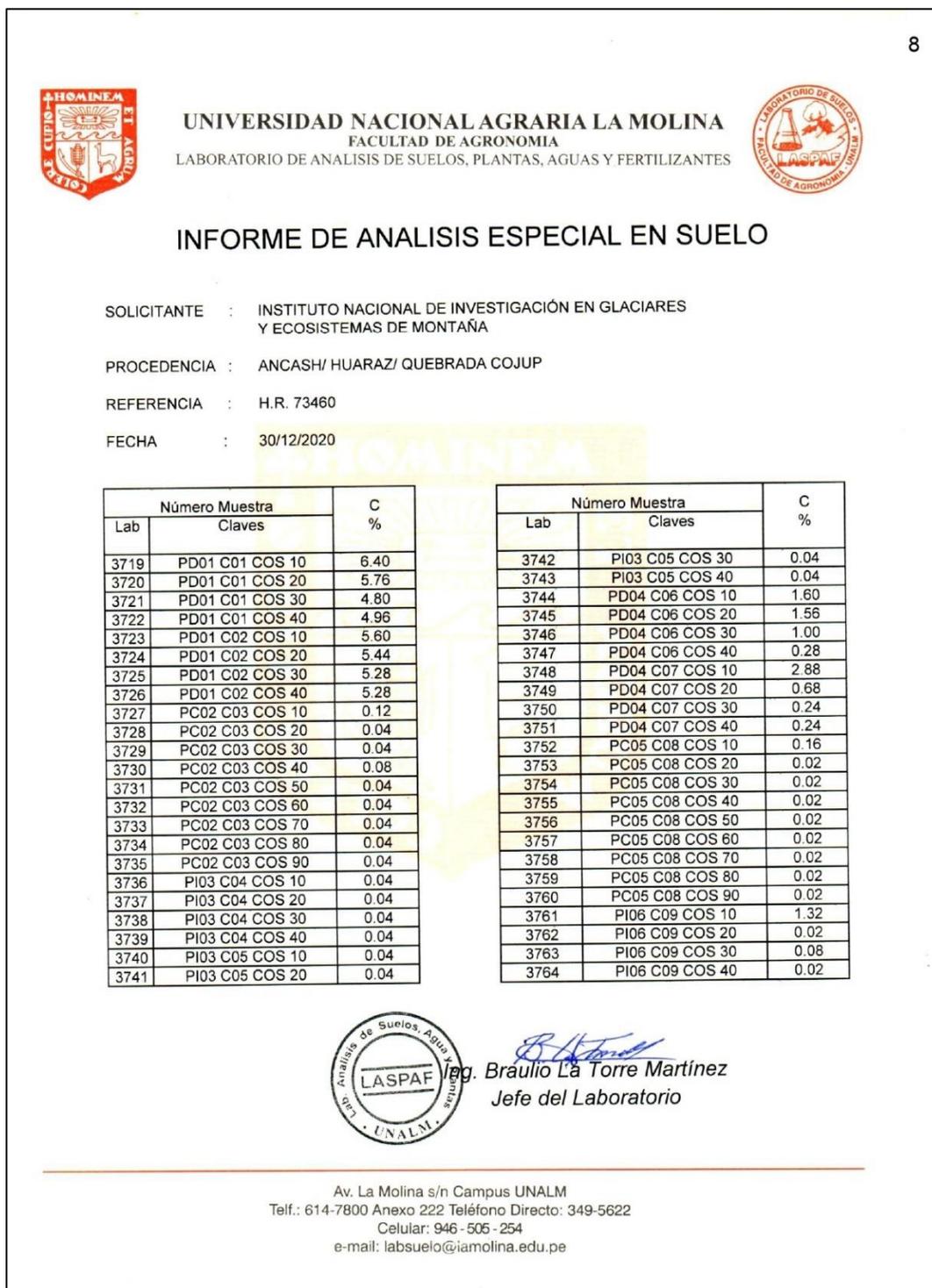


Figura 43. Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 1.



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES
 Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

PROCEDENCIA : ANCASH/ HUARAZ/ QUEBRADA COJUP

REFERENCIA : H.R. 73460

FECHA : 30/12/2020

Número Muestra		C %
Lab	Claves	
3765	PI06 C10 COS 10	2.04
3766	PI06 C10 COS 20	1.84
3767	PI06 C10 COS 30	1.16
3768	PI06 C10 COS 40	0.04
3769	PD07 C11 COS 10	1.36
3770	PD07 C11 COS 20	0.24
3771	PD07 C11 COS 30	0.04
3772	PD07 C11 COS 40	0.04
3773	PD07 C12 COS 10	1.48
3774	PD07 C12 COS 20	0.44
3775	PD07 C12 COS 30	0.16
3776	PD07 C12 COS 40	0.04
3777	PC08 C13 COS 10	1.20
3778	PC08 C13 COS 20	0.12
3779	PC08 C13 COS 30	0.04
3780	PC08 C13 COS 40	0.04
3781	PC08 C13 COS 50	0.04
3782	PC08 C13 COS 60	0.04
3783	PC08 C13 COS 70	0.04
3784	PC08 C13 COS 80	0.04
3785	PC08 C13 COS 90	0.04
3786	PI09 C14 COS 10	3.20
3787	PI09 C14 COS 20	1.52

Número Muestra		C %
Lab	Claves	
3788	PI09 C14 COS 30	1.12
3789	PI09 C14 COS 40	0.08
3790	PI09 C15 COS 10	0.44
3791	PI09 C15 COS 20	0.04
3792	PI09 C15 COS 30	0.04
3793	PI09 C15 COS 40	0.12
3794	PD10 C16 COS 10	2.56
3795	PD10 C16 COS 20	1.12
3796	PD10 C16 COS 30	1.04
3797	PD10 C16 COS 40	0.80
3798	PD10 C17 COS 10	0.58
3799	PD10 C17 COS 20	0.04
3800	PD10 C17 COS 30	0.10
3801	PD10 C17 COS 40	0.02
3802	PC11 C18 COS 10	1.88
3803	PC11 C18 COS 20	0.04
3804	PC11 C18 COS 30	0.04
3805	PC11 C18 COS 40	0.04
3806	PC11 C18 COS 50	0.04
3807	PC11 C18 COS 60	0.04
3808	PC11 C18 COS 70	0.04
3809	PC11 C18 COS 80	0.04
3810	PC11 C18 COS 90	0.04



Ing. Braulio La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
 Celular: 946 - 505 - 254
 e-mail: labsueio@iamolina.edu.pe

Figura 44. Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 2.



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES
Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

PROCEDENCIA : ANCASH/ HUARAZ/ QUEBRADA COJUP

REFERENCIA : H.R. 73460

FECHA : 30/12/2020

Lab	Número Muestra	C %
	Claves	
3811	PI12 C19 COS 10	6.72
3812	PI12 C19 COS 20	0.68
3813	PI12 C19 COS 30	0.52
3814	PI12 C19 COS 40	0.36
3815	PI12 C20 COS 10	6.56
3816	PI12 C20 COS 20	0.84
3817	PI12 C20 COS 30	0.48
3818	PI12 C20 COS 40	0.40
3819	PD13 C21 COS 10	7.52
3820	PD13 C21 COS 20	6.72
3821	PD13 C21 COS 30	2.88
3822	PD13 C21 COS 40	0.80
3823	PD13 C22 COS 10	6.08
3824	PD13 C22 COS 20	5.44
3825	PD13 C22 COS 30	4.80
3826	PD13 C22 COS 40	4.16
3827	PC14 C23 COS 10	1.04
3828	PC14 C23 COS 20	0.04
3829	PC14 C23 COS 30	0.04
3830	PC14 C23 COS 40	0.04
3831	PC14 C23 COS 50	0.04
3832	PC14 C23 COS 60	0.04
3833	PC14 C23 COS 70	0.04

Lab	Número Muestra	C %
	Claves	
3834	PC14 C23 COS 80	0.04
3835	PC14 C23 COS 90	0.04
3836	PI15 C24 COS 10	5.44
3837	PI15 C24 COS 20	4.00
3838	PI15 C24 COS 30	3.76
3839	PI15 C24 COS 40	2.24
3840	PI15 C25 COS 10	5.20
3841	PI15 C25 COS 20	5.20
3842	PI15 C25 COS 30	3.84
3843	PI15 C25 COS 40	4.64
3844	PD16 C26 COS 10	7.52
3845	PD16 C26 COS 20	7.52
3846	PD16 C26 COS 30	5.76
3847	PD16 C26 COS 40	3.84
3848	PD16 C27 COS 10	10.24
3849	PD16 C27 COS 20	8.96
3850	PD16 C27 COS 30	3.28
3851	PD16 C27 COS 40	1.32
3852	PC17 C28 COS 10	0.12
3853	PC17 C28 COS 20	0.04
3854	PC17 C28 COS 30	0.04
3855	PC17 C28 COS 40	0.04
3856	PC17 C28 COS 50	0.04



Ing. Braulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 45. Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 3.



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES
 Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

PROCEDENCIA : ANCASH/ HUARAZ/ QUEBRADA COJUP

REFERENCIA : H.R. 73460

FECHA : 30/12/2020

Número Muestra		C %
Lab	Claves	
3857	PC17 C28 COS 60	0.04
3858	PC17 C28 COS 70	0.04
3859	PC17 C28 COS 80	0.04
3860	PC17 C28 COS 90	0.04
3861	PI18 C29 COS 10	5.60
3862	PI18 C29 COS 20	4.16
3863	PI18 C29 COS 30	3.36
3864	PI18 C29 COS 40	2.40
3865	PI18 C30 COS 10	6.40
3866	PI18 C30 COS 20	4.56
3867	PI18 C30 COS 30	2.88
3868	PI18 C30 COS 40	3.68
3869	PD19 C31 COS 10	3.92
3870	PD19 C31 COS 20	3.68
3871	PD19 C31 COS 30	3.84
3872	PD19 C31 COS 40	3.12
3873	PD19 C32 COS 10	5.20
3874	PD19 C32 COS 20	4.16
3875	PD19 C32 COS 30	4.08
3876	PD19 C32 COS 40	3.92
3877	PC20 C33 COS 10	2.76
3878	PC20 C33 COS 20	3.16
3879	PC20 C33 COS 30	6.28

Número Muestra		C %
Lab	Claves	
3880	PC20 C33 COS 40	0.44
3881	PC20 C33 COS 50	0.02
3882	PC20 C33 COS 60	0.02
3883	PC20 C33 COS 70	0.06
3884	PC20 C33 COS 80	0.02
3885	PC20 C33 COS 90	0.02
3886	PC20 C33 COS 100	0.88
3887	PI21 C34 COS 10	2.40
3888	PI21 C34 COS 20	1.92
3889	PI21 C34 COS 30	2.56
3890	PI21 C34 COS 40	2.64
3891	PI21 C35 COS 10	2.88
3892	PI21 C35 COS 20	1.84
3893	PI21 C35 COS 30	1.96
3894	PI21 C35 COS 40	1.80



Brulio La Torre Martínez
Ing. Brulio La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
 Celular: 946-505-254
 e-mail: labsuelo@iamolina.edu.pe

Figura 46. Informe del laboratorio con respecto a los resultados del COS en la microcuenca Cojup, parte 4.



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

PROCEDENCIA : ANCASH/ HUARAZ/ QUEBRADA COJUP

REFERENCIA : H.R. 73461

FECHA : 30/12/2020

Lab	Número Muestra Claves	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
3895	PD01C01	67	26	7	Fr.A.
3896	PD02C03	89	8	3	A.
3897	PI03C05	81	14	5	A.Fr.
3898	PD04C07	83	12	5	A.Fr.
3899	PC05C08	87	10	3	A.
3900	PI06C10	91	6	3	A.
3901	PD07C12	45	32	23	Fr.
3902	PC08C13	21	48	31	Fr.Ar.
3903	PI09C15	13	66	21	Fr.L.
3904	PD07C17	93	4	3	A.
3905	PC11C18	95	2	3	A.
3906	PI12C20	83	14	3	A.Fr.
3907	PD13C22	69	26	5	Fr.A.
3908	PC14C23	93	4	3	A.
3909	PI15C25	69	26	5	Fr.A.
3910	PD16C27	65	30	5	Fr.A.
3911	PC17C28	95	2	3	A.
3912	PI18C30	65	28	7	Fr.A.
3913	PD19C32	61	34	5	Fr.A.
3914	PI21C35	77	20	3	A.Fr.

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



B. La Torre Martínez
Ing. Brulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@iamolina.edu.pe

Figura 47. Informe del laboratorio con respecto a los resultados de la textura del suelo en la microcuenca Cojup.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

DECLARACIÓN JURADA

Los autores suscritos en el presente documento DECLARAMOS BAJO JURAMENTO que somos los autores responsables legales de la calidad y originalidad del contenido del proyecto de investigación científica, así como, del informe de la investigación científica realizado.

TITULO: Impacto del cambio climático sobre el carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup – Áncash, entre el periodo 2021-2099

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA INFORME DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN () TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO) ()
PREGRADO

PROYECTO DE TESIS PREGRADO () TESIS PREGRADO (X)

PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA () TESIS MAESTRÍA ()

PROYECTO DE TESIS DOCTORADO () TESIS DOCTORADO ()

El equipo investigador integrado por:

Table with 6 columns: N, APELLIDOS Y NOMBRES, FACULTAD, CONDICIÓN (NOMBRADO, CONTRATADO, MERITO, estudiante, OTROS), CÓDIGO docente Número de matrícula del estudiante, Autor Coautor Asesor. Rows include JARA TARAZONA, Edison Edu and CRUZ MONZÓN, José Alfredo.

Handwritten signature in black ink

.....

FIRMA

47548991

DNI

Handwritten signature in blue ink

.....

FIRMA

18887838

DNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN REPOSITORIO DIGITAL RENATI – SUNEDU

Trujillo, 19 de agosto de 2022

Los autores suscritos del INFORME DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Titulado: Impacto del cambio climático sobre el carbono orgánico del suelo en la microcuenca Cojup – Áncash, entre el periodo 2021-2099

AUTORIZAMOS SU PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL, REPOSITORIO RENATI – SUNEDU, ALICIA – CONCYTEC, CON EL SIGUIENTE TIPO DE ACCESO:

- A. Acceso abierto [X]
B. Acceso restringido [] (datos del autor y resumen del trabajo)
C. No autorizo su publicación []

Si eligió la opción restringido o No autoriza su publicación sírvase a justificar

ESTUDIANTE DE PREGRADO: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN [] TESIS [X]
ESTUDIANTE DE POSGRADO: TESIS MAESTRÍA [] TESIS DOCTORAL []
DOCENTE: INFORME DE INVESTIGACIÓN [] OTROS []

El equipo investigador integrado por

Table with 6 columns: N, APELLIDOS Y NOMBRES, FACULTAD, CONDICIÓN (NOMBRADO, CONTRATADO, MERITO, estudiante, OTROS), CÓDIGO docente Número de matrícula del estudiante, Autor Coautor Asesor. Rows include JARA TARAZONA, Edison Edu and CRUZ MONZÓN, José Alfredo.

[Signature]
.....
FIRMA

47548991
DNI

[Signature]
.....
FIRMA

18887838
DNI