

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**CALIBRACIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO Y
DETERMINACIÓN DE FIRMAS HIDROLÓGICAS**

**CALIBRACIÓN SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO Y FIRMAS
HIDROLÓGICAS “C02”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

MELISSA ANAHÍ HERNÁNDEZ GUERRA

melissa.hernandez@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS

carlos.paezb@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, MELISSA ANAHÍ HERNÁNDEZ GUERRA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MELISSA ANAHÍ HERNÁNDEZ GUERRA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MELISSA ANAHÍ HERNÁNDEZ GUERRA, bajo mi supervisión.

CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS PhD.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MELISS ANAHÍ HERNÁNDEZ GUERRA

PhD. CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS

DEDICATORIA

Para mis padres y hermanos por ser un pilar fundamental en mi vida académica y personal, a mis abuelos maternos por confiar en el proceso y esperar los mejores resultados para mí, también para algunos amigos que a pesar de la distancia me han apoyado emocionalmente.

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos por estar durante el trayecto en mi carrera universitaria, siempre apoyándome en todo lo necesario para superar los desafíos que se han presentado en el proceso académico y emocional. Además, a mi tutor de tesis por guiarme y fortalecer mis conocimientos durante la elaboración del trabajo de integración curricular.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Descripción del proyecto	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	4
2.1 Propiedades y clasificación del suelo.....	5
2.1.1 Materia Orgánica	5
2.1.2 Carbono orgánico	5
2.1.3 Conductividad eléctrica y pH del suelo	6
2.1.4 Gravedad específica del suelo	6
2.1.5 Densidad aparente seca.....	6
2.1.6 Porosidad	6
2.1.7 Clasificación SUCS.....	7
2.1.8 Contenido volumétrico del agua.....	7
2.2 Permitividad eléctrica	7

2.3	Sensor multiparamétrico CS650	7
2.4	Ecuación de Topp.....	8
2.5	Ecuación específica de calibración.....	8
2.6	Serie temporal	8
2.7	Firma hidrológica.....	9
3.	METODOLOGÍA	9
3.1	Sitio de estudio	9
3.2	Muestreo en la estación CO2.....	12
3.3	Propiedades del suelo	16
3.3.1	Materia orgánica	16
3.3.2	Carbono orgánico del suelo (SOC)	16
3.3.3	pH.....	17
3.3.4	Conductividad eléctrica.....	17
3.3.5	Gravedad específica del suelo	18
3.3.6	Densidad aparente.....	20
3.3.7	Porosidad	22
3.3.8	Clasificación SUCS.....	22
3.4	Curva de calibración	25
3.5	Serie temporal.....	33
3.6	Firma hidrológica.....	34
4	RESULTADOS	35
4.1.	Materia orgánica, carbono orgánico del suelo, pH y conductividad eléctrica	35
4.2.	Gravedad específica, densidad aparente y porosidad.....	35
4.3	Clasificación SUCS.....	37
4.4	Contenido volumétrico de agua.....	39
4.5	Curva de calibración para la estación C02	40
4.6	Serie temporal.....	41

4.7	Firma hidrológica	43
5	DISCUSIÓN.....	44
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
8	ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la estación CO2.....	10
Figura 2. Vista (afuera/dentro) de la estación CO2	11
Figura 3. Proximidades de la zona de estudio	11
Figura 4. Cilindro de PVC enterrado para la toma de muestra inalterada	13
Figura 5. Extracción de la muestra de suelo en la estación C02	14
Figura 6. Muestro con los anillos Kopecky en la estación C02	15
Figura 7. Toma de muestra alterada de la estación C02	15
Figura 8. Medición de pH en el suelo	17
Figura 9. Preparación de la muestra para utilizar en la bomba al vacío	18
Figura 10. Experimento de gravedad específica.....	19
Figura 11. Muestras inalteradas para densidad aparente.....	21
Figura 12. Tamizado de la muestra para granulometría	23
Figura 13. Muestra para límite líquido	24
Figura 14. Límite plástico del suelo.....	25
Figura 15. Muestra inalterada con el reflectómetro CS650 conectado al Data Logger CR300..	26
Figura 16. Toma de muestra para punto de calibración.....	28
Figura 17. Muestreador metálico con la submuestra de suelo.....	29
Figura 18. Muestras inalteradas en saturación para contenido volumétrico de agua	31
Figura 19. Muestra inalterada de la estación C02 dentro del horno.....	31
Figura 20. Muestra después de estar en el horno y toma de última muestra	32
Figura 21 Curva de granulometría	38
Figura 22. Curva de calibración de la estación Rumihurco.....	41
Figura 23. Serie temporal de la estación C02.....	42
Figura 24. Diagrama de cajas para VWC del suelo	42
Figura 25 Firma hidrológica de la estación C02.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del área de estudio y código del sensor de humedad del suelo de EPMAPS	3
Tabla 2 Ubicación geográfica de la estación CO2 en UTM 17S WGS84	9
Tabla 3 Tiempo ejecutado en cada actividad.....	12
Tabla 4 Rango de permitividad eléctrica en la estación C02.....	27
Tabla 5 Volúmenes de los muestreadores metálicos	27
Tabla 6 Formato y datos para la curva de calibración.....	33
Tabla 7 Formato del archivo .csv para la serie temporal.....	34
Tabla 8 Resultados de materia orgánica, carbono orgánico del suelo, pH y conductividad eléctrica.....	35
Tabla 9 Resultados de gravedad específica	35
Tabla 10 Resultado de la densidad aparente del suelo.....	36
Tabla 11 Resultado de porosidad del suelo	36
Tabla 12 Granulometría.....	37
Tabla 13 Resultados de Granulometría	37
Tabla 14. Resultados límite líquido	38
Tabla 15 Resultados de límite plástico.	39
Tabla 16 Resultados clasificación SUCS.....	39
Tabla 17. Resultados VWC de las submuestras	40
Tabla 18. Datos de validación y muestras saturadas	40
Tabla 19. Datos estadísticos de VWC histórico en la estación C02.....	43
Tabla 20. Datos del muestreo en los puntos de calibración.....	54
Tabla 21. Resultados de los puntos de calibración.....	55

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Densidad del agua y coeficiente de temperatura (K) para diversas temperaturas.....	53
Anexo 2. Datos de necesarios para la determinación del VWC y Densidad Aparente Seca	55
Anexo 3. Resultados de VWC y de Densidad Aparente	56
Anexo 4. Script para la generación de curva de calibración en R.....	57
Anexo 5. Script para la transformar VWC con Topp a permitividad eléctrica.....	59
Anexo 6. Script para transformar permitividad a VWC calibrado	61
Anexo 7. Script para generación de series temporales, diagrama de caja y firma hidrológica ..	61

RESUMEN

La humedad del suelo influye en procesos del ciclo del agua entre las interacciones de la superficie terrestre y la atmósfera. En Quito la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) garantiza la disponibilidad y emite alertas de precipitaciones intensas mediante su red hidrometeorológica, dentro de esta red se incluye la estación Rumihurco (C02). En la estación C02 se determina el contenido volumétrico de agua (θ_v) con el método reflectometría de dominio del tiempo TDR donde los datos de permitividad (K_a) utilizan la ecuación de Topp para obtener los datos de humedad del suelo, sin embargo, la ecuación predeterminada llega a subestimar los datos en algunos suelos como lo especifica el manual Campbell del sensor CS650 aplicado en la estación de Rumihurco. Por tanto, se debe obtener una ecuación de calibración específica para la estación C02. Los datos calibrados de θ_v nos permite determinar una serie temporal que presente la relación de precipitación y humedad del suelo en un determinado tiempo, además con los datos calibrados se obtiene una firma hidrológica mediante una función de densidad de probabilidad (PDF) que permite la presentar detallada y cualitativamente la variabilidad del θ_v en el suelo. La curva de calibración se obtiene de una muestra inalterada dentro de un cilindro de PVC de diámetro 40 cm y alto 30 cm, mientras en laboratorio se obtiene muestras que sirven para obtener la curva de calibración y también se hace la caracterización del suelo mediante la determinación de pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de carbono, porosidad y densidad aparente. Los análisis en laboratorio determinan que el suelo en la estación Rumihurco es arena limoso, con 6.37 pH, conductividad eléctrica 6.37 $\mu\text{S}/\text{cm}$. 5.91% de materia orgánica, 3.42 % de carbono orgánico, porosidad 66% y densidad aparente de 1.01 g/cm^3 . Finalizado la elaboración de la curva de calibración se determinó que la ecuación de Topp subestima los valores de θ_v , porque los valores obtenidos con la ecuación de calibración específica presentan valores un poco más altos de humedad del suelo y tienen relación con la serie temporal que presentan a mayores precipitaciones incrementa el contenido volumétrico de agua en el suelo. Por otro lado, el PDF obtenido demuestra que existen tres picos predominantes respecto a la probabilidad de obtener el θ_v , mediante una distribución multimodal.

PALABRAS CLAVE: Rumihurco, contenido volumétrico del agua, permitividad, calibración, precipitación, Topp, firma hidrológica.

ABSTRACT

Soil moisture influences water cycle processes in the interactions between the land surface and the atmosphere. In Quito, the Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) ensures water availability and issues alerts for heavy rainfall through its hydrometeorological network. This network includes the Rumihurco station (C02). At station C02, the volumetric water content (θ_v) is determined using the time domain reflectometry (TDR) method, where permittivity (K_a) data are used with Topp's equation to obtain soil moisture data. However, the predetermined equation tends to underestimate the data in some soils, as specified in the Campbell manual for the CS650 sensor used at the Rumihurco station. Therefore, a specific calibration equation must be obtained for station C02. Calibrated θ_v data allows for the determination of a time series that presents the relationship between precipitation and soil moisture over a given time period. Additionally, calibrated data provides a hydrological signature through a probability density function (PDF) that allows for a detailed and qualitative presentation of the variability of θ_v in the soil. The calibration curve is obtained from an undisturbed sample within a PVC cylinder with a diameter of 40 cm and a height of 30 cm. In the laboratory, samples are taken to obtain the calibration curve and also to characterize the soil by determining pH, electrical conductivity, organic matter content, carbon content, porosity, and bulk density. Laboratory analyses determined that the soil at the Rumihurco station is silty sand, with 6.37 pH, electrical conductivity of 6.37 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5.91% organic matter, 3.42% organic carbon, 66% porosity, and a bulk density of 1.008 g/cm^3 . Upon completing the calibration curve, it was determined that Topp's equation underestimates the (θ_v) values, because the values obtained with the specific calibration equation show slightly higher soil moisture values and correlate with the time series, indicating that higher precipitation increases the volumetric water content in the soil. Furthermore, the obtained PDF demonstrates that there are three predominant peaks regarding the probability of obtaining θ_v , through a multimodal distribution.

KEYWORDS: Rumihurco, volumetric water content, permittivity, calibration, precipitation, Topp, hydrological signature.

1. INTRODUCCIÓN

Descripción del proyecto

La humedad del suelo es protagonista en los procesos del ciclo del agua entre las interacciones de la superficie terrestre y la atmósfera. Tanto la humedad y la textura del suelo influyen considerablemente en el clima (Fatichi et al., 2020). Los procesos biogeoquímicos sirven para regular la interacción entre la atmósfera y suelo, modificando el intercambio y transporte de gases dependiendo de la humedad (Rubol et al., 2013).

Los suelos que caracterizan las zonas en las cuencas hidrográficas de la quebrada Rumihurco, tienen aguas superficial y subterránea. Además en los horizontes de estos suelos ubicados entre una altura 3450 msnm hasta 3800 msnm, correspondientes a las partes medias de la cuenca, se destacan actividades de pastoreo y cultivo (Risser & Gallegos, 1997). Estos suelos están relacionados al interactuar entre los sistemas hídricos, por su dinámica hidrogeológica y las características propias del suelo porque logran retener y purificar el agua lluvia, regulando el flujo del agua hacia los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Enriquez, 2021).

La función de los suelos es suministrar o reservar agua por la característica de un nivel bajo de evapotranspiración, alta concentración de materia orgánica y niveles altos de humedad (Córdova et al., 2015). Por tanto, el sistema hídrico dentro de los suelos debe ser analizado porque su función destaca en el almacenamiento de agua, que es dirigido a las cuencas hidrográficas para distribuir agua a las comunidades más cercanas (Hofstede et al., 2023). La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) es responsable del monitoreo y administración de las funciones para abastecer agua, al garantizar su disponibilidad y elaborar alertas de precipitaciones intensas al analizar su red hidrometeorológica, dentro de esta red se incluye la estación Rumihurco C02 (Ontaneda, 2020).

Según Shukla, (2013) “el valor de humedad se obtiene con el método directos y métodos indirectos como la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) utilizado para monitorear y medir el contenido de agua en el suelo”. Además, para obtener el valor de humedad del suelo se presenta como contenido volumétrico con la fracción entre el volumen de agua (m^3) y el volumen total del suelo (m^3) (Shukla, 2013).

En el método TDR, aplica la constante dieléctrica, sin embargo, depende de la humedad del suelo y características físicas del suelo, por tanto, es necesario realizar una ecuación de

calibración específica para el suelo de interés en los sensores de este método (Topp & Ferre, 2000).

1.1 Objetivo general

Obtener la ecuación de calibración para el sensor CS650 para la humedad del en la estación C02 para determinar su firma hidrológica.

1.2 Objetivos específicos

1. Recolectar muestras inalteradas y alteradas en campo de la estación C02 para elaborar análisis de laboratorio en LEMSUR y LDIA.
2. Utilizar muestras alteradas de campo para establecer el pH, conductividad eléctrica, textura, materia orgánica y carbono orgánico.
3. Obtener la curva de calibración del sensor CS650 mediante los datos de laboratorio.
4. Emplear la ecuación de calibración en los datos de permitividad para elaborar la serie de temporal suelo y obtener una firma hidrológica.

1.3 Alcance

El proyecto tiene el objetivo de calibrar el sensor CS650 de humedad del suelo de la estación C02 de Rumihurco para establecer su firma hidrológica, por tanto, el inicio de la calibración empieza al extraer muestras alteradas e inalteradas del suelo de la estación. La ecuación de calibración se desarrolla con los resultados en laboratorio y el uso del software RStudio usar los datos de las series de la humedad y precipitación históricas que son distribuidas por EPMAPS, que da como resultado los valores de permitividad y humedad con la ecuación de calibración de la estación y con esto desarrollar una firma hidrológica.

El muestreo para determinar las propiedades del suelo se realizará con el apoyo de EPMAPS y análisis de laboratorio para cada muestra alterada e inalterada (Shukla, 2013). Las muestras alteradas al no estar en sus condiciones de temperatura iniciales cambian las propiedades y estructura del suelo durante la extracción y transporte en frascos o bolsas que detengan el ingreso de aire (Quichimbo et al., 2012). Las muestras inalteradas utilizan herramientas para la extracción como tubos cilíndricos que facilita la recolección de la muestra al iniciar con una perforación en el suelo y mientras más se inserta el cilindro en el interior se conserva la muestra

de suelo, sin que las condiciones el ambiente afecten sus propiedades iniciales (Faz Cano et al., 2011).

Tabla 1. Características del área de estudio y código del sensor de humedad del suelo de EPMAPS

Código	Cuenca	Cobertura vegetal
C02	Quebrada Rumihurco	Pasto - Almohadilla

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos para cada muestra se ejecutarán en el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) y en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA). Para muestras alteradas los ensayos para determinar la textura del suelo se realizan con clasificación SUCS en donde el proceso influye en determinar los límites plásticos y líquidos del suelo, y con los datos se obtiene el índice de plasticidad (Shukla, 2013).

La materia orgánica del suelo se determina con el método de pérdida por ignición que en el procedimiento se registra la pérdida de peso del suelo a una temperatura de 500 °C en una mufla durante 24 horas (Manna et al., 2007). Para determinar el pH la muestra de suelo es mezclada con agua y se sumerge un electrodo de pH para la medición respectiva, se sigue el mismo procedimiento para conductividad eléctrica (Armijo & Maraver, 2006).

La densidad aparente se obtiene de la muestra inalterada mediante un ensayo que implica utilizar un cilindro metálico donde el peso y el volumen son conocidos a una profundidad específica se obtiene la muestra de suelo dentro del interior del cilindro (Shukla, 2013). La muestra entra a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 110°C durante 24 horas y después del secado, se pesan los cilindros con la muestra seca nuevamente para obtener la densidad aparente del suelo (Shukla, 2013).

El contenido volumétrico se mide por el método de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) que aplica sondas entre dos varillas insertadas horizontalmente, comúnmente es empleado por sus resultados de calidad e interactúa con el suelo inmediatamente en contacto con las varillas (López et al., 2005). El contenido volumétrico del agua se obtiene con los datos de permitividad registrados con sensor CS650 (Shukla, 2013). En suelos que tiene un alto contenido de materia orgánica debe tener una curva de calibración específica del suelo para determinar valores de contenido volumétrico de agua porque la ecuación general aplicada demuestra no registrar datos precisos para todos los suelos (Gnatowski et al., 2018).

La curva de calibración se obtendrá de la muestra inalterada extraída con un cilindro de PVC de 40 cm de diámetro y 30 cm de largo, conectado al sensor CS650 para tener valores de permitividad del suelo con la ecuación de Topp (Zeitoun et al., 2021). Obtener los datos para la curva serán en el laboratorio LEMSUR, al iniciar con la saturación por capilaridad desde la base del cilindro, posteriormente se insertará el sensor CS650 que transmitirá ondas electromagnéticas en la muestra inalterada, para recolectar los datos se aplica el programa Datalogger CR300 que almacena los valores hasta obtener un conjunto de datos que serán descargados.

La curva de calibración se obtiene con las mediciones del sensor insertado en el suelo de la muestra inalterada y las mediciones se correlacionan con mediciones directas de humedad del suelo obtenido con las submuestras en laboratorio que se obtienen de la muestra inalterada que está en el cilindro de PVC (Topp & Ferre, 2000). Por último, con los datos obtenidos ya calibrados de determinará una serie temporal que presenta la variación en el tiempo de la precipitación y humedad en el suelo con los datos de la estación C02 abastecidos por EPMAPS. firma hidrológica que representa una distribución gráfica y frecuencia de las series temporales de humedad del suelo para obtener los análisis basados en procesos de modelos hidrológicos (Araki et al., 2022a)

Por último, se obtendrá una firma hidrológica mediante un PDF que presenta información estadística de los datos de humedad o comportamiento dentro del suelo que permite cuantificar la dinámica de variables hidrológicas como la humedad del suelo (Gnann et al., 2021). Por tanto, para determinar la firma hidrológica en el trabajo de titulación se realizará con el análisis estadístico con los datos históricos de precipitación y humedad de EPMAPS.

1.4 Marco teórico

El contenido volumétrico de agua en el suelo al ser analizado permite determinar posible sequía, presencia de escorrentía e infiltración o inundaciones pluviales, relacionando los resultados son datos históricos de las precipitaciones (Escobar-González et al., 2024). Además, en el caso de montañas obtener los valores de humedad facilita modelamientos del comportamiento de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Las mediciones en el suelo para conocer el valor de contenido volumétrico de agua se obtiene mediante un sensor multiparamétrico o reflectómetros de contenido de agua, en distintas profundidades donde sea instalando el sensor en el suelo con dirección horizontal, para obtener

datos precisos respecto a cada suelo en que se analiza se realizan estudios para encontrar las calibraciones por horizonte y vegetación (Páez-Bimos et al., 2023).

Los valores obtenidos mediante el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), han sido utilizados con una ecuación que relaciona los valores de permitividad (K_a) a contenido volumétrico de agua (θ_v) con la ecuación de Topp (Topp et al., 1980). Algunos estudios en suelos volcánicos con alto contenido de materia orgánica demuestran que los valores obtenidos mediante el método TDR son subestimados al aplicar la ecuación predeterminada, por tanto, se deben realizar calibraciones mediante la toma de muestras en campo para obtener los resultados de permitividad y la humedad con la ecuación calibrada específica para el tipo de suelo que se desea estudiar (Campbell Scientific, 2018).

Las estaciones de EPMAPS cuentan con reflectómetros de contenido de agua para determinar la humedad del suelo, que permite realizar análisis durante la gestión de recursos hídricos y la escorrentía, sin embargo, estos reflectómetros deben ser calibrados para el tipo de suelo y vegetación.

2.1 Propiedades y clasificación del suelo

2.1.1 Materia Orgánica

La descomposición de la fracción orgánica del suelo es lo que se considera materia orgánica, obtenido en procesos de descomposición, tiene como función en el suelo de aportar nutrientes a las plantas mediante procesos de mineralización, depende del clima para establecer las especies vegetales, animales y microbianas que actuarán en el suelo, así establecen los rangos de concentración de materia orgánica (Campbell, 1978). La cantidad de materia orgánica se ha visto relacionada con la dinámica del carbono en el suelo, mediante sus procesos de estabilización llegan a puntos de saturación del carbono que protegen los niveles de materia orgánica en el suelo (Six et al., 2002).

2.1.2 Carbono orgánico

El carbono orgánico está presente en compuestos orgánicos del suelo y aporta nutrientes indispensables para las plantas influyendo en procesos del ciclo de carbono, en suelos Andosoles tienen un alto contenido de carbono orgánico por los procesos de formación de minerales en el suelo (Iwasaki et al., 2017). Según Pribyl, (2010) el carbono orgánico “puede relacionarse con un factor de conversión de van Bemmelen, que relaciona la materia orgánica al tener como referencia que tiene una concentración superior a 58% de carbono.”

2.1.3 Conductividad eléctrica y pH del suelo

La actividad de los iones de hidrogeno (pH) dentro del suelo, sirve como indicador para determinar la cantidad de nutrientes en las plantas, según Sollins et al. , (1996) el pH “ tiene un efecto sobre la carga superficial y la disgregación de compuestos carboxílicos en compuestos orgánicos, además se presenta en suelos arenosos volcánicos valores de 5 a 7 pH ”. Por otro lado, la conductividad eléctrica es la presencia de ondas electromagnéticas en el suelo y la diferente circulación de corriente como la constante dieléctrica (Shukla, 2013).

2.1.4 Gravedad específica del suelo

Los análisis para determinar la gravedad específica G_s son principalmente para estimar la proporción de espacios vacíos dentro del suelo, obtenido la distribución del tamaño de las partículas del suelo y sus unidades son g/cm^3 (American Society for Testing and Materials, 2013). Según American Society for Testing and Materials, (2023) la “gravedad específica es la relación de fase en los suelos entre el grado de saturación y su vacío, por tanto, se refiere a la gravedad específica de la materia sólida del suelo”.

2.1.5 Densidad aparente seca

La densidad aparente es la masa de suelo (g) relacionada con el volumen total del suelo (cm^3), que equivale al volumen de sólidos inorgánico y orgánico del suelo más el volumen de poros (Shukla, 2013). En suelos empleados para cultivo tiene una densidad aparente seca baja indicando mayor retención de agua , debido a que, se han perdido sedimentos (Perrin et al., 2001). En el volcán Pichincha los suelos cercanos se caracterizan por tener densidad aparente seca muy altos a una altura de 4000msnm, según Poulénard et al.,(2001) en “el horizonte A2 de un suelo con material predominante de arena tiene una densidad de $0.9 g/cm^3$ ”.

2.1.6 Porosidad

La porosidad relaciona el volumen de todos los poros en el suelo (cm^3), es decir, los poros de agua y aire con el volumen del suelo total (cm^3), relacionada con el tamaño de las partículas que forman el suelo, al tener un tamaño de partícula grande la porosidad disminuye (Shukla, 2013). Según Poulénard, (2001) en “el horizonte A2 de suelo areno tiene una porosidad de $64 (cm^3/cm^3)$ a una profundidad de 20 a 40cm donde una alta porosidad acelera la infiltración de las precipitaciones mejorando la estabilización estructural de material volcánico”.

2.1.7 Clasificación SUCS

El método de clasificación SUCS detalla las características del suelo y determina la categoría del tipo de suelo al que pertenece para conocer cuáles son las actividades ingenieriles que se pueden realizar en el suelo (Thomas, 2012). Esta clasificación mediante los ensayos de laboratorio consiste en la distribución de partículas en el suelo llamado gravimetría para obtener los porcentajes de arena, grava y material fino en el suelo; los límites de plásticos y líquidos que sirven para el índice de plasticidad (American Society for Testing and Materials, 2020).

2.1.8 Contenido volumétrico del agua

El agua contenida dentro del suelo expresado en volumen es lo que se denomina contenido volumétrico del agua (θ_v), puede depender del nivel de porosidad según el tipo de suelo, por tanto, para determinar su valor se puede relacionar el valor de densidad aparente con el contenido de agua gravimétrico (Shukla, 2013). Según Perrin et al., (2001) los “suelos Andosoles de la parte superior en la cuenca de la quebrada de Rumihurco, dentro de los horizontes de 0 a 50cm de profundidad presentan un alto contenido de agua con valores de 0 a 65 cm³/cm³ en saturación”.

2.2 Permitividad eléctrica

La permitividad eléctrica (K_a), es denominada constante dieléctrica, está influenciada en como las ondas electromagnéticas llegan al suelo e interaccionan en el medio, además el valor de la permitividad está relacionada con la composición del suelo como minerales, agua y aire (Shukla, 2013). Según Topp, (1980) la “constante dieléctrica está relacionada con el contenido volumétrico de agua en el suelo, es decir, que cuando aumenta la constante dieléctrica aumenta el contenido de agua y para determinar su valor se emplea el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)”.

2.3 Sensor multiparamétrico CS650

Para aplicar el método TDR se utiliza el sensor multiparamétrico CS650 que monitorea el contenido de agua y permitividad en el suelo mediante sus varillas metálicas paralelas de 30cm de largo, para la medición en suelo se interseca horizontal o en otra orientación respecto a la superficie (Campbell Scientific, 2018). Los datos obtenidos de conductividad eléctrica se basan en atenuar la señal que reciben las varillas y relaciona el periodo de oscilación para aplicar la ecuación de Topp que obtiene el contenido volumétrico de agua (Topp et al., 1980).

2.4 Ecuación de Topp

El estudio realizado por Topp et al., (1980) ha demostrado que “existe una correlación entre la permitividad con el contenido volumétrico de agua cuando se emplea el método TDR para la medición en el suelos empelados para agricultura o ganadería, además aplicaciones en hidrología que sirven para realizar estudios de inundaciones y eficiencias de cultivos”.

Según Topp et al., (1980) con “estudios realizados en laboratorio para suelos desde franco areno a suelos arcilloso y diferentes niveles de humedad, determinando una relación empírica entre permitividad (K_a) con contenido volumétrico del agua (θ_v) mediante una ecuación que permite obtener resultados más precisos que pueden ser empleados en diferentes tipos de suelos en comparación a otros métodos empleados para determinar humedad”. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\theta_v = -5.3 * 10^{-2} + 2.92 * 10^{-2} * K_a - 5.5 * 10^{-4} * K_a^2 + 4.3 * 10^{-6} * K_a^3 \quad (1)$$

2.5 Ecuación específica de calibración

La ecuación empírica que emplea el método TDR es la ecuación de Topp et al., (1980), sin embargo, se ha demostrado que en algunos suelos los valores obtenidos de contenido volumétrico del agua son subestimados como en suelos con alta cantidad de materia orgánica (Kassaye et al., 2019). Según (Campbell Scientific, 2018) en “la ecuación de Topp presenta buenos resultados en suelos minerales, mientras en suelos orgánicos, volcánico y de textura fina con porosidad mayor a 0.5 y densidad aparente mayor a 1.55 g/cm³, llega a subestimar el contenido de humedad”

2.6 Serie temporal

Las series temporales en hidrología permiten interpretar como actúan las precipitaciones y humedad a lo largo del tiempo, los datos de precipitaciones facilitan análisis para conocer y determinar eventos predominantes como sequías al conocer la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo y se presenta en milímetros (mm), mientras en la materia de hidrológica la humedad permite conocer infiltración dentro del suelo y relacionar el contenido volumétrico del agua (Xi et al., 2023).

2.7 Firma hidrológica

Las firmas hidrológicas son recursos gráficos que cuantifican estadísticamente datos hidrológicos como la cantidad volumétrica de agua, permitiendo monitorear y modelar variaciones en el ciclo hidrológico (Mcmillan, 2020). Según (Araki et al., 2022) “el comportamiento de la humedad del suelo es presentada mediante firmas de humedad con datos métricos miden las variaciones de las series temporales de humedad del suelo para analizarlas”.

3. METODOLOGÍA

3.1 Sitio de estudio

Para obtener la curva de calibración del sensor de humedad para la estación Rumihurco “CO2”, perteneciente a EPMAPS se realizó una visita a campo en la ubicación geográfica descrita en la tabla 2.

Tabla 2 Ubicación geográfica de la estación CO2 en UTM 17S WGS84

Norte	9985645.00 m S
Este	774102.00 m E
Elevación	3563 msnm

Fuente: (EPMAPS, 2024)

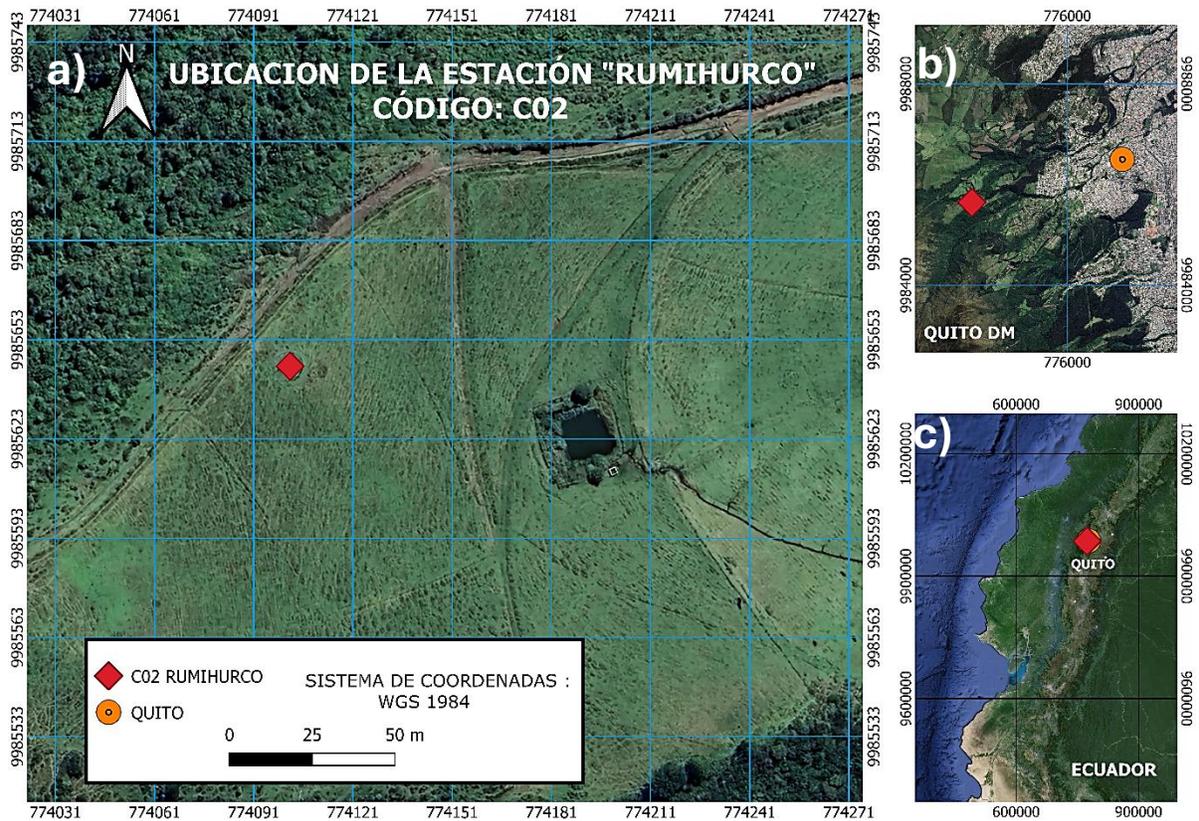


Figura 1. Mapa de la estación CO2

Fuente: Elaboración propia

Nota. a) Localización de la estación Rumihurco CO2 donde se observa cobertura vegetal como bosque a los alrededores y pasto más cercano a la estación, además un cuerpo de agua para el ganado y cultivo en las zonas bajas de la estación. **b)** Localización del sitio de estudio con relación a Quito. **c)** Vista de la estación en Ecuador.

La estación está rodeada por cobertura vegetal como pasto-almohadilla, además en la parte baja de la zona de estudio se observa pequeños territorios de pastizales que se abastecen con un pequeño cuerpo de agua cercano a las casas que en el territorio. No se observó ganado vacuno cercano a la estación, pero en las zonas bajas y cercanas a los cultivos en la visita a campo se observó.



Figura 2. Vista (afuera/dentro) de la estación CO2

Nota: La estación se encuentra rodeada con una alta densidad de pasto y azorella con alta estatura vegetal.

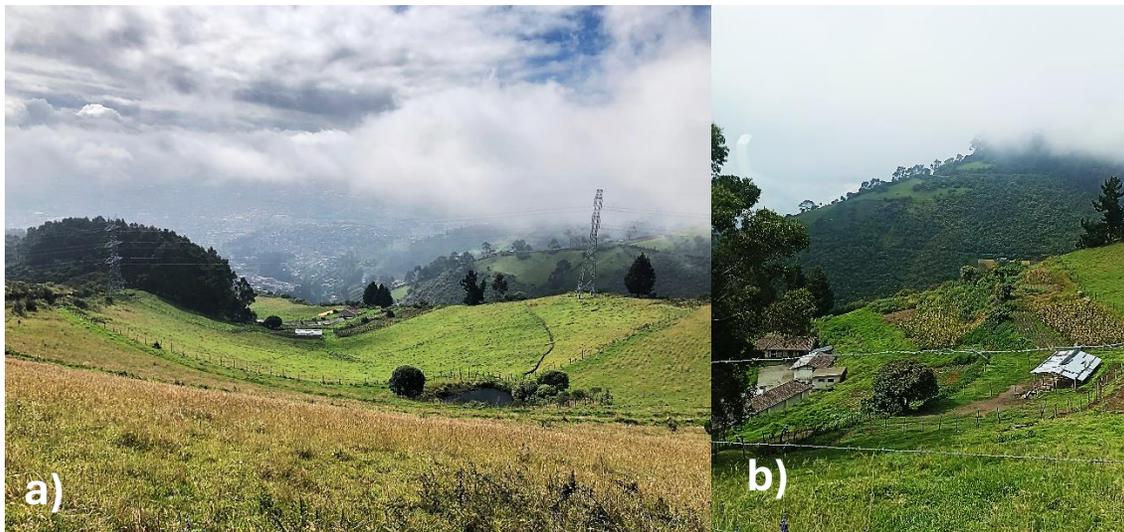


Figura 3. Proximidades de la zona de estudio. a) En la vista desde la estación se observa que no existe cultivos y la presencia un cuerpo de agua usado para el ganado y cultivo, además hay una sección de bosque en las proximidades de la estación. b) En la parte baja de la estación están los cultivos y presencia de casas.

3.2 Muestreo en la estación CO2

El análisis con las muestras que se tomaron en el suelo de la zona de estudio se debe procesar con ensayos en laboratorio para obtener los datos que nos permitan determinar la ecuación de calibración del sitio, las muestras obtenidas fueron alteradas e inalteradas con el apoyo de EPMAPS.

Para iniciar con el muestreo se establecieron los materiales para la recolección y transporte de la muestra alterada e inalterada, según la movilidad que se tendría en la estación y las características del sitio según la descripción de EPMAPS. Por tanto, entre los equipos y materiales seleccionados en la etapa de recolección y transporte durante la salida de campo fueron fundas ziploc para muestras alteradas, anillos Kopecky (100 cm³ c/u) para las muestras inalteradas y un cilindro de PVC para la muestra inalterada para conectar el sensor en laboratorio.

Entre las herramientas para extraer las muestras fueron barreno, martillo, tablas, plástico filme, pala, bailejo, tijera, navaja, sierra y una camilla para la movilidad de la muestra inalterada hacia la camioneta. En la tabla 3, se detalla el tiempo empleado en cada actividad hasta llevar las muestras al laboratorio LEMSUR.

Tabla 32 Tiempo ejecutado en cada actividad

Ruta	Hora de inicio	Hora de fin
Movilidad estación P11- estación C02	~ 01:15pm	~ 02:10pm
Movilidad estación C02 - LEMSUR	~ 04:18pm	~ 04:56pm
Actividad	Tiempo empleado aproximado	
Recolección de la muestra inalterada en el cilindro PVC	~2 horas	
Recolección de muestras inalteradas en 2 anillos Kopecky	~30 minutos	
Recolección muestra alterada (aprox. 2kg)	~ 20 minutos	

Elaboración propia

El tiempo en cada actividad fue realizado con alrededor de 5 personas para facilitar el proceso y se realizaban dos actividades al mismo tiempo, además el día de muestreo se presencié una fuerte precipitación, lo que dificultó la movilidad vehicular hasta llegar a la estación provocando que se caminara hasta la estación aproximadamente durante diez minutos.

Etapas de toma de muestras alteradas e inalteradas

El muestreo consistió en obtener una muestra inalterada dentro de un cilindro de PVC, por tanto, se empezó localizando exactamente el sensor de la estación para que la toma de muestra inalterada esté cercana en una superficie casi plana, luego se colocó el cilindro PVC y con la ayuda de las tablas para evitar romper el cilindro al momento de martillar varias veces con el combo hasta que el cilindro se encuentre completamente enterrado en el suelo como se observa en la figura 4.



Figura 4. Cilindro de PVC enterrado para la toma de muestra inalterada

Nota: Se debe golpear el cilindro de PVC hasta que esté completamente enterrado en el suelo, evitando romper los bordes de este.

Una vez enterrado el cilindro se debe cavar a sus alrededores, mientras al mismo tiempo se retiró la vegetación alrededor del cilindro y con la ayuda de la sierra se cortaron las raíces de la parte inferior de la muestra para que al momento de la extracción no se desprenda una proporción de suelo. Por último, una vez extraída la muestra se utilizó plástico filme para enrollar uniformemente la muestra para evitar que durante el transporte hacia el laboratorio LEMSUR se llegara a modificar sus características o se pierda parte de la muestra.



Figura 5. Extracción de la muestra de suelo en la estación C02

Nota: a) Remoción de suelo alrededor de la muestra para una correcta extracción. b) Uso de papel filme para el embalaje de la muestra y evitar pérdidas.

Por otro lado, para la toma de muestras inalteradas que sirven como puntos de validación en la curva de calibración se utilizó los anillos Kopecky, para la determinación de la profundidad para el muestreo cerca del sensor de la estación se utilizó un barreno que permitió llegar hasta una profundidad de 30cm donde el horizonte A del suelo llegaba a su límite, una vez llegado a esa profundidad se cavó y con el combo se golpeó el anillo de manera vertical, tal como se muestra en la figura 6 para obtener la muestra. Para conservar las propiedades del suelo dentro del anillo, se eliminaron las raíces con la ayuda de tijeras que salían como excedentes para tener en ambos lados del anillo una superficie uniforme, estas muestras se colocaron dentro del maletín de almacenamiento de los anillos hasta llevarlos al laboratorio LEMSUR.



Figura 6. Muestro con los anillos Kopecky en la estación C02

Nota: a) Uso del combo para la extracción de muestras con los anillos Kopecky. b) Se debe igualar la superficie de ambos lados del anillo antes de guardarlas para evitar errores en los ensayos de laboratorio.

Por último, para la muestra alterada se aprovechó el espacio cavado cerca del sensor para recoger con la ayuda de una pala 2kg de suelo que fueron guardados en una funda ziploc evitando que quede aire dentro de la misma al momento de sellarla, además se retiró material vegetal como raíces.



Figura 7. Toma de muestra alterada de la estación C02

Nota: Como se observa es primordial que antes de guardar la muestra en la funda ziploc se retire las raíces.

3.3 Propiedades del suelo

Para obtener las diferentes propiedades del suelo se trabajó con 2kg de muestra alterada y con los dos anillos Kopecky

3.3.1 Materia orgánica

El método empleado fue obtener la materia orgánica por incineración (LOI) que expone la muestra de suelo a altas temperaturas. Se inició usando dos crisoles que antes de 24 horas fueron tarados al estar durante 24 horas en una estufa y se traspasaron a un desecador por 2 horas, además antes de ser usados se registraron los pesos iniciales de cada crisol y se agregó 10g de suelo alterado que se conservaba en la funda de ziploc en cada crisol. Una vez que se pesó con una balanza analítica se ingresaron los crisoles con suelo en una estufa por 24 horas para que el suelo se seque en alrededor de 110°C y nuevamente pasado ese tiempo se dejó en el desecador por 2 horas registrando el peso de cada crisol (Eyherabide et al., 2014).

Se retiraron los crisoles del desecador y se procedió a colocar los crisoles con suelo en una mufla a 550°C para que se produzca la incineración del suelo, pasado ese tiempo otra vez se colocó en el desecador por 2 horas y se registró el peso (Eyherabide et al., 2014). Con los datos registrados la materia orgánica contenida en el suelo se determinó por diferencia de los datos de pesos finales e iniciales, según Eyherabide, (2014) la materia orgánica se obtiene con la siguiente ecuación 2.

$$MOS = \frac{\text{Peso suelo a } 110^{\circ}C - \text{Peso suelo después de la calcinación}}{\text{Peso suelo a } 110^{\circ}C} * 100 \quad (2)$$

3.3.2 Carbono orgánico del suelo (SOC)

Una vez obtenido el valor de materia orgánica, según Pribyl, (2010) “el factor convencional de 1.724 se divide la cantidad de materia orgánica obtenida por este factor para obtener carbono orgánico”.

3.3.3 pH

La determinación de pH según la (FAO, 2021), se inició pesando 10g de suelo en una balanza analítica, posteriormente el pesado de suelo se traspasó a un vaso de precipitación de 100ml, para utilizar el pH-metro se aplicó una relación 1:25, por tanto, se vertió en el vaso de precipitación 25ml de agua destilada. La muestra debe estar homogénea, por tanto, se puso el vaso de precipitación sobre un agitador de laboratorio como se observa en la figura 8. Esta agitación se procesó durante una hora, pasado la hora de agitación a 150 rpm, se dejó en reposo el mismo tiempo y al momento de usar el medidor de pH se agitó diez segundos antes de insertar el electrodo sin tocar las paredes del vaso de precipitación se esperó hasta que la medición se estabilice en la pantalla del pH-metro.



Figura 8. Medición de pH en el suelo

Nota: **a)** Preparación de la muestra para medición. **b)** Agitación de la muestra para homogeneizar, se debe cubrir la abertura para evitar perder muestra por agitación

3.3.4 Conductividad eléctrica

Para obtener el valor de conductividad eléctrica se utilizó la muestra restante para determinar pH, posteriormente con un conductímetro se insertó en el vaso de precipitación el electrodo de manera vertical sin tocar la base, se esperó hasta que los valores se estabilizaran y se registró el valor de conductividad eléctrica.

3.3.5 Gravedad específica del suelo

El procedimiento para obtener los datos de gravedad específica fue realizado mediante las normas ASTM D854 (American Society for Testing and Materials, 2023). Para iniciar con el ensayo la muestra de suelo alterada se colocó en un recipiente metálico dentro de un horno a 110°C por 24 horas, pasado ese tiempo se utilizó un mortero para triturar los restos de suelo que estén aglomerados, una vez terminado se pasó la muestra por un tamiz N°4 hasta obtener 100g de suelo.

El suelo se traspara a un envase de agitador neumático con poca agua destilada para que al momento de agitación se homogeneice la muestra durante cinco minutos, como se presenta en la figura 9, esta muestra se traspasó con un embudo seco a un matraz de balón graduado de 500ml que anteriormente se registró el peso, luego se añade agua destilada hasta la cuarta parte del matraz, se conecta la probeta con una bomba al vacío mientras se observa que aparecen burbujas dentro de la probeta que contiene el agua destilada y el suelo durante 30 minutos.



Figura 9. Preparación de la muestra para utilizar en la bomba al vacío

Nota: **a)** Agitación automática para homogeneizar la muestra. **b)** Traspaso de la muestra al matraz de balón donde los restos quedados en el embudo se desplazan con agua destilada para no perder material.

La colocación del matraz de balón con la muestra conectada en la bomba al vacío se realizó durante tres veces alrededor de 30 minutos cada uno, este proceso fue hasta aforar la probeta como se observa en la figura 10, con pausas de 15 minutos para evitar el daño de la bomba. Una vez aforado se registró con un termómetro la temperatura de la muestra en el matraz, por último, se traspasa la muestra a un recipiente de aluminio que anteriormente se registró el peso.



Figura 10. Experimento de gravedad específica

Nota: **a)** Aforo de la probeta con la muestra de suelo. **b)** Registro de temperatura de la muestra después del aforo.

Para determinar el valor de la gravedad específica, es primordial que se registre la temperatura del después del aforo para relacionar la temperatura durante el ensayo con el respectivo coeficiente de temperatura (K), que se observan en el anexo 1. Con los datos registrados durante el ensayo se emplea la ecuación 3, según la norma ASTM D854 (American Society for Testing and Materials, 2023).

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * p_{w,t}) \quad (3)$$

Donde:

V_p : Volumen del matraz de balón. (ml)

M_p : Masa del matraz seco

$M_{pw,t}$: Masa del matraz y agua a la temperatura del ensayo (g)

Con el resultado de $M_{pw,t}$, se emplea la ecuación 4 para obtener la gravedad específica, que abarca el peso del suelo seco después del horno con la masa del matraz de balón, agua destilada y el suelo una vez aforado.

$$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} \quad (4)$$

Donde:

M_s : Masa de suelo seco del horno (g)

$M_{pw,t}$: Masa de la matraz, agua y suelo a la temperatura del ensayo (g)

Por último, con el valor registrado de K según la temperatura registrada durante el ensayo, para estandarizar la ecuación de gravedad específica en la temperatura de 20°C, se emplea la ecuación 5:

$$G_{20^\circ C} = K * G_t \quad (5)$$

Donde:

K: Coeficiente para temperatura según la obtenida en laboratorio.

3.3.6 Densidad aparente

El procedimiento fue en base a la norma ASTM-D7263 American Society for Testing and Materials,(2009) que consistió en obtener el volumen conocido de suelo utilizando un cilindro que en este caso fueron los anillos Kopecky de acero inoxidable. Se inició, con la toma de muestra

inalterada en la salida a campo dentro de los anillos y una vez extraído del suelo se selló con las tapas de los anillos para no perder material.

En laboratorio se calcula el volumen del suelo utilizando las dimensiones internas del cilindro aunque técnicamente cada anillo tiene 100 cm³ y se colocaron en una capsula para registrar el peso inicial y se ingresaron dentro del horno a 110°C por 24 horas, una vez pasado ese tiempo se registró el suelo seco restando el peso de la cápsula y del muestreador, por último, el valor obtenido del suelo seco se dividió para el volumen de los anillos, como se presenta en la ecuación 6 (Shukla, 2013).

$$\text{Densidad aparente} = \frac{SS}{V} \quad (6)$$

Donde:

SS: Masa de suelo seco (g)

V: Volumen del muestreador cilíndrico metálico (ml)



Figura 11. Muestras inalteradas para densidad aparente

3.3.7 Porosidad

Una vez obtenido los valores de gravedad específica y densidad aparente, según Shukla, (2013) “para calcular la porosidad en laboratorio se puede determinar el índice de vacíos (e) en la muestra con los datos anteriores”, mediante la ecuación 7:

$$e = \frac{\text{densidad de partículas sólidas}}{\text{densidad aparente}} - 1 \quad (7)$$

Después de obtener el valor de vacíos, se puede obtener la porosidad (n) (Shukla, 2013).

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (8)$$

3.3.8 Clasificación SUCS

Dentro de la clasificación SUCS se realizaron varios ensayos que nos permitieron obtener la textura del suelo, según la norma ASTM D2487 (American Society for Testing and Materials, 2017). Los ensayos realizados fueron índices de plasticidad, límite líquido y límite plástico.

Granulometría

Para determinar granulometría de la muestra de suelo se utilizó la norma D6913M de American Society for Testing and Materials (2017). Para determinar la granulometría de un suelo se procedió inicialmente con la obtención de una muestra de 200g y se lava la muestra, para realizar su secado a una humedad que permita facilitar el tamizado, por tanto, se colocó dentro del horno a 100°C.

Pasado las 24 horas el suelo secado se pasó por una serie de tamices de aberturas calibradas “3/8 pulgadas, N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100, N°140, N°200”, seguido del último tamiz se tiene una bandeja que tiene el material totalmente tamizado. Mientras se realizó la tamización se pesó en una balanza analítica y se registró su masa después de terminar el proceso.



Figura 12. Tamizado de la muestra para granulometría

Con los valores registrados de cada tamiz se calculó los porcentajes acumulativos de masa obtenida con respecto al peso inicial de 200g, con los porcentajes se elaboró una curva granulométrica que describe la distribución de tamaños de partículas dentro del suelo, por cada abertura de los tamices utilizados.

Límite líquido

El procedimiento para este límite se realizó con la norma ASTM D4318(American Society for Testing and Materials, 2017). El material de suelo que se utilizó fue el que anteriormente pasó por el tamiz 40, asegurando que no exista ninguna presencia de raíces para no alterar el resultado, esto se colocó sobre una cápsula una pequeña porción para ajustar la humedad en el caso que sea necesario y se homogeneiza con agua destilada, asegurando que el suelo se vuelva muy húmedo. Usando la copa de casagrande se colocó con ayuda de una espátula una porción de muestra que esté completamente uniforme con una superficie horizontal y con el acanalador del mismo equipo se hizo una ranura de 10mm sobre la superficie.

Una vez puesto el suelo sobre la copa, se gira la manivela de la copa de casagrande para dar los golpes hasta que se haga una abertura, sin embargo, el rango hasta llegar hasta este punto solo puede ser de 15 a 35 golpes, se contó el número de golpes pasando 2 segundos , una vez que se haya unido la rotura se anota el número de golpes con el que se unió y con el acanalador se retira de forma horizontal el material donde se obtuvo la unión de un ancho de 13mm que corresponde aproximadamente a la espátula y se colocó en una cápsula (American Society for Testing and Materials, 2017).



Figura 13. Muestra para límite líquido

Se añadió a una muestra de suelo agua antes de ser golpeada, para que el mismo procedimiento mencionado anteriormente se obtenga en los rangos para un cierre entre 25 a 35 golpes, otro, para la unión entre 20 y 30 golpes, y el último, para la unión que requiera de 15 a 25 , finalmente, se determinó el contenido volumétrico de agua para aplicar la ecuación 9 (American Society for Testing and Materials, 2017).

$$\text{Límite Líquido} = V * \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (9)$$

Donde:

V : Contenido de agua (%)

N : Número de golpes

Límite plástico

Una vez finalizado el límite líquido se utilizó el material de suelo que sobró para emplear en este ensayo, se tomó un porcentaje que se enrolló con la palma de la mano sobre una superficie lisa que fue sobre el mesón del laboratorio, hasta que se tenga un diámetro de 3.2 mm y no se rompa (American Society for Testing and Materials, 2017).

Una vez que se siguió enrollando hasta obtener pequeñas dimensiones se llegó al límite plástico, por tanto, los rollitos desmenuzados se depositaron en un cápsula y se cubrió con papel filme instantáneamente para posteriormente determinar el contenido volumétrico de agua, como se hicieron por duplicados se registró el promedio.



Figura 14. Límite plástico del suelo

Índice de plasticidad

Para determinar se utilizó la norma ASTM D4318 (American Society for Testing and Materials, 2017). El procedimiento se realizó después de obtener el límite plástico y límite líquido, debido a que el índice de plasticidad es la diferencia de ambos, como se presenta en la ecuación 10.

$$\text{Índice de plasticidad} = LL - PL \quad (10)$$

Donde:

LL: Límite líquido

PL: Límite plástico

3.4 Curva de calibración

Determinación del contenido volumétrico de humedad con la permitividad eléctrica.

El ensayo con la muestra inalterada dentro del cilindro de PVC se realizó en las instalaciones del laboratorio LEMSUR, perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Por tanto, una vez que se realizó el muestreo en campo de la estación C02, se llevó la muestra a una superficie lisa que no permita movimientos inapropiados para no perder material. Se empleó el programa Data Logger CR300 conectado al reflectómetro o sensor CS650 insertado en la muestra inalterada para seguir el procedimiento según la norma ATMS D2216 de American Society for Testing and Materials, (2019).

La recolección de datos de permitividad empezó retirando el papel filme en la parte inferior y superior que estaba como embalaje en la muestra inalterada para evitar pérdidas durante el transporte, además se hizo una abertura en la parte donde se insertaron las varillas metálicas del sensor CS650 para hacer la conexión con el Data Logger CR300, como se observa en la figura 15. Por último, para que la muestra no pierda su humedad drásticamente se colocó sobre un recipiente de plástico y se vertió agua hasta que la superficie de agua este al nivel del sensor, esto como objetivo que la muestra llegue a su punto de saturación.

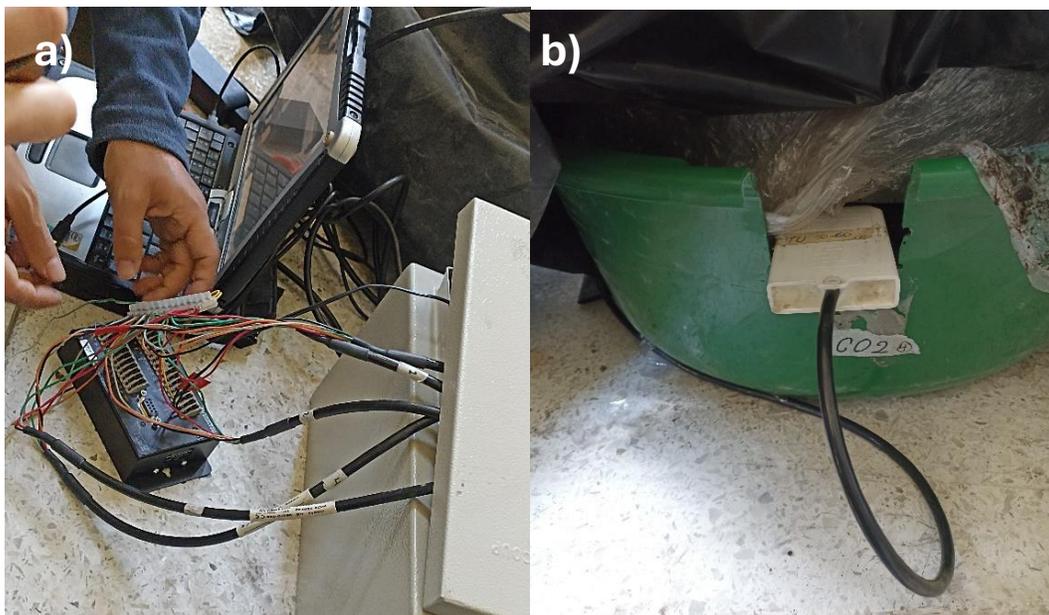


Figura 15. Muestra inalterada con el reflectómetro CS650 conectado al Data Logger CR300

Nota: **a)** Conexión del sensor hacia el Data Logger CR300 para el registro de resultados en programa. **b)** Es primordial que el sensor esté correctamente insertado en la muestra sin dejar espacios de aire para evitar errores en la lectura de datos.

Se dejó procesar los resultados de la permitividad hasta que bajen continuamente, los datos fueron registrados en el programa LoggerNet (Campbell, 2017), hasta que los datos no varíen al llegar a la saturación de la muestra y la permitividad se mantenga constante. Por tanto, para obtener los siguientes datos de permitividad, se retiró la muestra inalterada del recipiente de plástico para que esté a temperatura ambiente.

Para determinar los rangos a los que se tomó cada medición de la permitividad se utilizó la ecuación 11 para obtener siete muestras, que se obtiene registrando el valor máximo de la

permitividad a la que llegó la muestra en el cilindro de PVC y conociendo los valores máximos y mínimos de los datos históricos de permitividad proveniente de EPMAPS.

$$Rango = \frac{K_{amr} - K_{am}}{7} \quad (11)$$

Donde:

K_{amr} : Permitividad máxima de registrada con el sensor CS650.

K_{am} : Permitividad minimice de los datos históricos de EPMAPS.

Tabla 4 Rango de permitividad eléctrica en la estación C02

Estación	Mínimo	Máximo
C02	6.335	32.117

Fuente: EPMAPS, 2024

Cuando los valores estén cercanos a los rangos de permitividad para tomar la muestra dentro del cilindro de PVC, se deben conocer los volúmenes de los muestreadores metálicos que en otro trabajo de investigación fueron utilizados por tanto los volúmenes según Proaño, (2024) los valores se presentan en la tabla 5:

Tabla 3 Volúmenes de los muestreadores metálicos

Muestreador	Volumen (cm ³)
M1	42.60
M2	41.84
M3	42.21
M4	42.36
M5	42.60
M6	42.50
M7	42.81
M8	42.50
M9	41.86

Fuente: (Proaño, 2024)

El muestreo con el muestreador metálico inicia marcando 7.5cm, midiendo desde el borde del sensor hacia sus lados laterales según indica el manual para que no existan interferencias y se

designó el área que sirvió para tomar las muestras (Campbell Scientific, 2018). Posteriormente, se registró el valor de permitividad cuando se colocó el muestreador metálico sobre la superficie de la muestra y con la ayuda de un martillo de goma se clava el muestreador en un espacio que se haya retirado la cobertura vegetal en la parte superior del agujero, mientras la segunda muestra es en la parte inferior del mismo agujero, los datos que se obtuvieron se realizaron un promedio para el valor de ese punto de muestreo. Para extraer el muestreador del agujero se retira suavemente con la manija incorporada en el muestreador en sentido horario y se quitó los excesos como las raíces o suelo que se quedó pegado en las paredes del muestreador.



Figura 16. Toma de muestra para punto de calibración

Se registra el código del muestreador con suelo y también el peso de la cápsula metálica sobre la que se colocó, luego ambos fueron pesados con una balanza analítica como se presentan en la figura 17. Una vez pesados, se ubicaron en un horno para secar a 100°C como lo establece la norma D2216 de American Society for Testing and Materials,(2019).

Una vez que el tiempo de 24 horas haya pasado, se retiran los muestreadores con suelo del horno y se pesa en conjunto el suelo seco, muestreador metálico y la cápsula, además para registrar el peso del muestreador se retiró el suelo seco y se limpió para pesar en una balanza analítica.

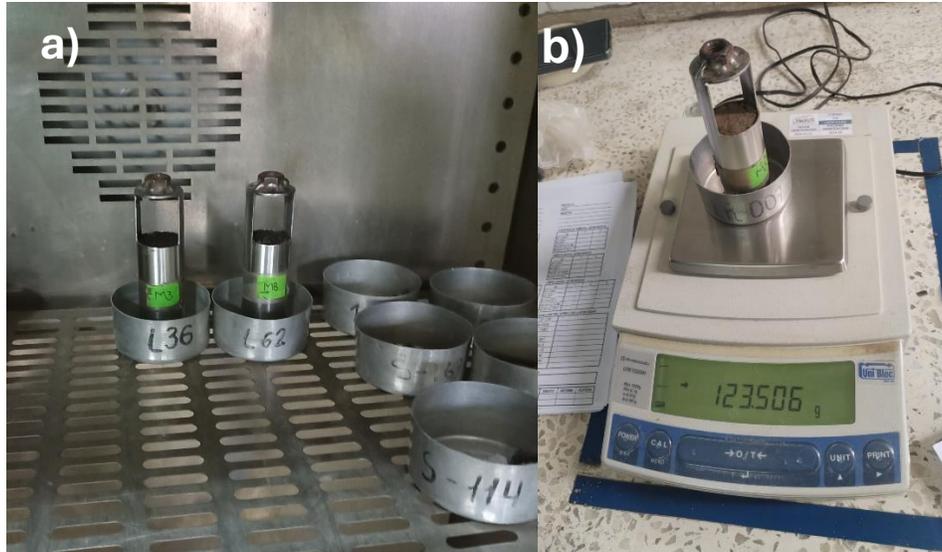


Figura 17. Muestreador metálico con la submuestra de suelo

Nota: a) Muestreadores metálicos con suelo en el horno a 100°C, se debe limpiar las paredes del muestreador para no tener errores en el peso. b) Peso del muestreador metálico, suelo y cápsula después de 24 horas en el horno a 100°C.

Estos valores fueron registrados en Excel para procesarlos y obtener la masa de agua dentro de cada muestreador y la masa de suelo seco después de sacar del horno pasada las 24 horas con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Masa de suelo seco} = (PSH + CP + MC) - CP - MC \quad (12)$$

Donde:

PSH: Peso de suelo seco después de salir del horno (g)

CP: Peso de la cápsula (g)

MC: Muestreador cilíndrico (g)

Además, con el suelo húmedo que se representa el suelo muestreado antes de meter el horno, mediante la diferencia del peso de la cápsula y el muestreador cilíndrico, se obtuvo la masa de agua en cada muestra, mediante la ecuación 13.

$$\text{Masa de agua} = SH - SS \quad (13)$$

Donde:

SH: Masa de suelo húmedo antes de meter al horno (g)

SS: Masa de suelo seco (g)

Una vez obtenido los valores anteriores se puede determinar el contenido gravimétrico de agua con la ecuación 14:

$$\text{Contenido gravimétrico} = \frac{MA}{SS} \quad (14)$$

Donde:

MA: Masa de agua (g)

SS: Masa de suelo seco (g)

Para llegar al valor de contenido volumétrico de agua (θ_v), según Shukla, (2013) se debe obtener valores de densidad aparente con la ecuación 6 para obtener el producto con el contenido gravimétrico de agua. Los valores de los volúmenes de los muestreadores se presentaron en la tabla 6, permitiendo obtener el contenido gravimétrico de agua con la ecuación 15, al considerar que la densidad del agua equivale a 1gcm^{-3} , unidades similares de la densidad aparente, por tanto, se realizó el producto con el valor de contenido gravimétrico del agua (Shukla, 2013).

$$\text{Contenido volumétrico agua} = \text{Contenido gravimétrico} * \text{densidad aparente} \quad (15)$$

Muestras inalteradas en anillos Kopecky saturadas

Se recalca que para las muestras en los anillos Kopecky que fueron saturadas como puntos de validación se realizó el mismo proceso de las submuestras para obtener el valor de contenido volumétrico de agua en campo, sin embargo, estas muestras de anillos Kopecky se dejó

aproximadamente dos semanas con agua al nivel del anillo hasta que lleguen a su punto de saturación antes de iniciar el mismo proceso mencionado anteriormente.



Figura 18. Muestras inalteradas en saturación para contenido volumétrico de agua

En las etapas finales que el sensor estuvo leyendo los datos de permitividad en la muestra, los datos ya no presentaban variaciones, por tanto, para obtener los siguientes puntos de permitividad y procesar los datos como anteriormente se mencionó se optó por exponer la muestra a una temperatura mayor. Por tanto, se ingresó la muestra cilíndrica con el PVC a un horno a 110°C por 24 horas retirando el sensor como se observa en la figura 19.



Figura 19. Muestra inalterada de la estación C02 dentro del horno.

Una vez pasada las 24 horas se extrajo la muestra del horno para reconectar el sensor y registrar el dato de permitividad. Se utilizaron los muestreadores cilíndricos para obtener una muestra

registrando el valor de la permitividad ese momento, este procedimiento se realizó para cada toma de muestra. Aproximadamente en una semana la muestra llegó al valor mínimo aproximado de permitividad, según los datos históricos de EPMAPS. Así, el último punto para la curva de calibración se obtuvo en el centro del de la muestra, debido a las condiciones en las que se encontraba el suelo al estar muy seco, la toma de las muestras fue compleja por desbordamientos, lo que llevó a la decisión de tomar la última muestra en el centro tras retirar el sensor. Los valores obtenidos en laboratorio de este proceso se presentan en el anexo 2 y los resultados de cada punto de muestreo en el anexo 3.



Figura 20. Muestra después de estar en el horno y toma de última muestra

Nota: **a)** Se conectó el sensor para registrar el último dato. **b)** Muestreo de la última muestra en el centro por desbordamiento en la base, por tanto, se retiró el cilindro para el muestreo.

Obtención de la curva de calibración con el programa R

Una vez procesado los datos de permitividad (Mean P) y contenido de humedad volumétrica de agua en la muestra inalterada (Mean VWC) según los puntos que se muestrearon se transcriben los datos promedio de la muestra en la parte superior e inferior del punto de muestreo en archivo .csv, con sus respectivas fechas para que el código utilizado en Rstudio lo procese, por tanto, el formato para .csv se presenta en la tabla 6. Además, dentro del archivo se coloca los datos de permitividad y humedad de suelo tomados en campo que sirven como validación de puntos en la curva de calibración para permitividad en campo (F_MeanP) y para contenido volumétrico de

agua del suelo en campo (F_MeanVWC). El código que sirvió para procesar los datos está en el Anexo 4. Otra información que se añade en el archivo .csv, son el tipo de vegetación y el horizonte en que se hizo el análisis de campo.

Tabla 4 Formato y datos para la curva de calibración

No.	Vegetation	Horizon	Date	Mean VWC	Mean P	F_Date	F_Mean VWC	F_Mean P
1	TU	A	8/5/2024	0.4849	34.84	26/03/2024	0.311	19.968
2	TU	A	13/05/2024	0.4461	30.84	26/03/2024	0.32	19.968
3	TU	A	27/05/2024	0.4461	26.4			
4	TU	A	10/6/2024	0.4037	23.58			
5	TU	A	4/7/2024	0.364	19.75			
6	TU	A	5/7/2024	0.3395	15.1			
7	TU	A	8/7/2024	0.2052	9.72			
8	TU	A	10/7/2024	0.1998	7.34			

Es necesario que se realice una comparación obtenida de la curva de calibración con los datos obtenidos en laboratorio y la curva predeterminada del sensor que utiliza la ecuación de Topp. Adicionalmente, de debe contrastar las ecuaciones de calibración obtenida para suelos con el mismo horizonte A por tanto, pueden ser las ecuaciones obtenidas por Páez-Bimos et al., (2023), es decir, las ecuaciones para TU2A y TUA.

3.5 Serie temporal

Para obtener la serie temporal que presente los datos de humedad con la ecuación de Topp, la ecuación de calibración y los valores de precipitación del EPMAPS, se inició procesado los valores de humedad proporcionados por EPMAPS para los años, 2022,2023 hasta abril de 2024, estos datos limpiados al eliminar valores repetidos o espacios vacíos sin datos ni fechas. Los valores de humedad depurados de EPMPAS permitieron obtener los valores de permitividad de la estación mediante el código en Rstudio que se presenta en el anexo 5. Además, con los datos ya calibrados también se ingresaron en el mismo código. Para que se procesen los datos correctamente se debe tener un archivo .csv, con encabezado "VWCTopp", por tanto, el código nos dará como producto un archivo .csv que contenga la permitividad obtenida con la ecuación del sensor, es decir, la de Topp cada valor de VWCTopp (Campbell Scientific, 2018).

Permitividad a VWC empelando la ecuación de calibración.

Con los datos de permitividad obtenido en el anterior paso registrados en un archivo .csv, con encabezado “P” se hace corren en el código del anexo 6, que aplica la ecuación de calibración obtenida mediante la curva de calibración de la estación C02, para obtener como resultado los datos de contenidos volumétrico de agua “VWC_Ec_Calib” calibrados en un archivo .csv.

Obtención del gráfico de series temporales.

Una vez obtenido los datos calibrados de contenido volumétrico de agua, los valores según la ecuación de Topp y con los datos de precipitación emitidos por EPMAPS para el periodo de mayo 2022 hasta abril del 2024, se añaden en un solo archivo .csv como se muestra en la tabla 8 para correr con el código del anexo 7, como resultado se generó el gráfico con la variación en el tiempo del contenido volumétrico de agua y las precipitaciones para el mismo periodo de tiempo. Además, dentro del código nos pide registrar el promedio del contenido volumétrico de agua obtenido de las muestras inalteradas para tener el punto máximo de saturación. Por último, dentro del mismo código y los mismos datos de entrada se genera un diagrama de cajas para que nos proporciona datos estadísticos de los datos de humedad calibrados, así como los cuartiles y los valores más representativos.

Tabla 5 Formato del archivo .csv para la serie temporal

Fecha	Topp	Calib	P
5/10/2022	0.36	0.379713813	0

Nota: La primera columna corresponde a la fecha del dato en la serie, Topp es el contenido volumétrico de agua por la ecuación normalizada del sensor, Calib es contenido volumétrico de agua con la ecuación de calibración y P son las precipitaciones.

3.6 Firma hidrológica

Para general el histograma mediante un histograma que representa la función de densidad de probabilidad para obtener la firma hidrológica como lo realiza Araki et al., (2022), una vez obtenido los datos de calibración se utiliza el código del *anexo 8*, con el mismo .csv empleado en la serie temporal y dentro del código se añadió el comando *geom_histogram*, para generar un histograma que presenta la función de densidad de probabilidad respecto al valor de contenido volumétrico de agua en el suelo.

4 RESULTADOS

Todos los ensayos fueron realizados en laboratorio, obteniendo los siguientes resultados para la estación C02.

4.1. Materia orgánica, carbono orgánico del suelo, pH y conductividad eléctrica

Los resultados presentados en la tabla 8, presenta materia orgánica (SOM), carbono orgánico del suelo (SOCS), pH y conductividad eléctrica, de un muestra alterada de suelo en el horizonte A tomado en la estación C02 y conservada en refrigeración dentro de una funda ziploc sin burbujas de aire, además en la zona de muestreo predomina prado y en las zonas bajas cultivos.

Tabla 6 Resultados de materia orgánica, carbono orgánico del suelo, pH y conductividad eléctrica

Propiedad	Resultado
Materia orgánica	5,91%
Carbono orgánico	3,42%
pH	6.37
Conductividad eléctrica	10.74 $\mu\text{s/cm}$

Fuente: Elaboración propia

4.2. Gravedad específica, densidad aparente y porosidad

Gravedad específica

Mediante una descripción manual visual estimada se obtuvo para una muestra de suelo arena limosa.

Tabla 7 Resultados de gravedad específica

Datos del ensayo	
Pasa tamiz N°4 (%)	96.6
Método de ensayo	B (muestra seca)
Volumen del matraz a 20 °C (ml)	500
Masa del matraz (g)	161.81
Masa del matraz + agua (g)	660.89

Tabla 9 Resultados de gravedad específica (Continuación)

Masa del matraz + agua + suelo (g)	699.45
Temperatura (°C)	20.5
Masa del recipiente (g)	160.93
Masa suelo seco + recipiente (g)	226.22
Masa suelo seco (g)	65.29
Gravedad específica, $G_{sT^{\circ}C}$	2.443
Coeficiente de temperatura, K	0.999
Gravedad específica, $G_{s20^{\circ}C}$	2.443

Fuente: (LEMSUR, 2024)

Densidad aparente

Se obtuvo mediante el promedio de los dos ensayos de la densidad aparente el siguiente valor presentado en la tabla 10.

Tabla 8 Resultado de la densidad aparente del suelo

Parámetro	Resultado
Densidad aparente	1.01 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Porosidad

Tabla 9 Resultado de porosidad del suelo

Datos de ensayo	Resultado
Densidad húmeda total, $p_t(g/cm^3)$	1.11
Contenido de humedad, w (%)	32.5
Densidad seca, $p_d(g/cm^3)$	0.84
Gravedad específica, $G_s 20^{\circ}C$	2.44
Relación de vacíos, e	1.94
Porosidad, n	66

Fuente: (LEMSUR, 2024)

4.3 Clasificación SUCS

Se muestran los resultados de una muestra de suelo alterada que fue tamizada para obtener la distribución granulométrica, según la tabla 12.

Tabla 10 Granulometría.

Granulometría		
Tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Porcentaje pasante (%)
3/4 in	19.000	100
3/8 in	9.500	99
No. 4	4.750	97
No. 10	2.000	92
No. 20	0.850	85
No. 40	0.425	70
No. 60	0.250	57
No. 100	0.150	49
No. 140	0.106	45
No. 200	0.075	42
Bandeja	<0.075	0

Fuente: (LEMSUR, 2024)

La tabla 13 presenta los resultados según el contenido de grava, arena o material fino para la muestra de suelo tamizada.

Tabla 11 Resultados de Granulometría

Material contenido	Porcentaje
Contenido de grava (%)	3
Contenido de arena (%)	55
Contenido de fino (%)	42

Fuente: (LEMSUR, 2024)

Una vez obtenido os porcentajes de granulometría por la técnica de tamizado se representa la curva granulométrica en escala logarítmica.

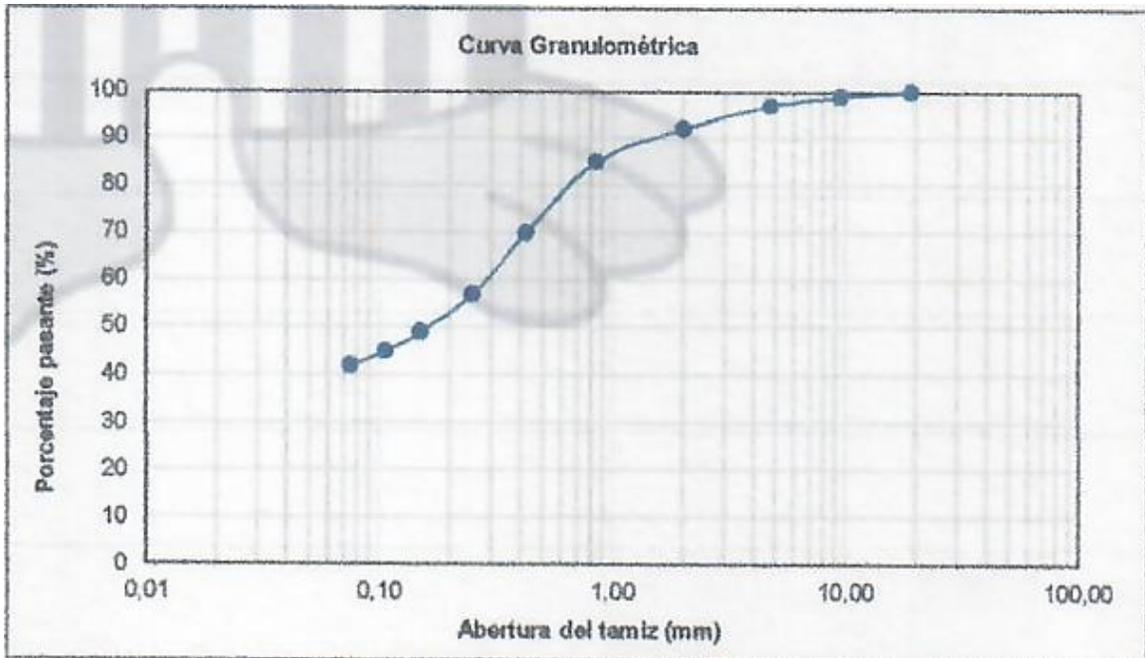


Figura 21 Curva de granulometría

Fuente: (LEMSUR, 2024)

Límite líquido

El resultado se obtuvo con el método de preparación de muestra húmedo con el método multipunto.

Tabla 12. Resultados límite líquido

Límite líquido			
Número de golpes	35	28	22
Masa cápsula (g)	9.230	9.696	9.490
Masa cápsula y suelo húmedo (g)	12.752	14.391	12.814
Masa cápsula y suelo seco (g)	11.694	12.962	11.793
Contenido de humedad (%)	42.9	43.7	44.3

Fuente: (LEMSUR, 2024)

Límite plástico

Con el método de enrollado manual según la ASTM D4318, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 13 Resultados de límite plástico.

Límite plástico	Enrollado manual	
	1	2
Masa cápsula (g)	9.609	9.819
Masa cápsula y suelo húmedo (g)	18.857	17.386
Masa cápsula y suelo seco (g)	16.508	15.942
Contenido de humedad (%)	34.0	33.0

Fuente: (LEMSUR, 2024)

Por último, con los resultados obtenidos se establece la clasificación SUCS del suelo para la estación C02 como arena limosa, en la tabla 16.

Tabla 14 Resultados clasificación SUCS

Resultados	
Contenido de humedad (%)	34
Límite líquido (%)	44
Límite plástico (%)	34
Índice de plasticidad (%)	10
Clasificación SUCS	
SM	Arena limosa

Fuente: (LEMSUR, 2024)

4.4 Contenido volumétrico de agua

En la tabla 17 se presentan los contenidos volumétricos de agua VWC obtenidos con las submuestras de la muestra inalterada con su respectiva permitividad registrada con el sensor y en la tabla 18, el resultado de las muestras inalteradas de los anillos Kopecky con su respectiva desviación y los valores de permitividad y VWC registrados en campo.

Tabla 17. Resultados VWC de las submuestras

Fecha	Humedad volumétrica (VWC)	Permitividad Promedio
08/05/2024	0,4849	34,840
13/05/2024	0,4461	30,840
27/05/2024	0,4474	26,400
10/06/2024	0,4037	23,580
04/07/2024	0,3640	19,750
05/07/2024	0,3395	15,100
08/07/2024	0,2052	9,720
10/07/2024	0,1998	7,340

Elaboración propia

Tabla 18. Datos de validación y muestras saturadas

Datos en campo		Muestras saturadas		
Permitividad	Humedad volumétrica (VWC)	Humedad gravimétrica	Humedad volumétrica	Desviación estándar VWC
32,700	0.197	0,52	0,52	0,014
32,700	0.197	0,53	0,54	

Elaboración propia

4.5 Curva de calibración para la estación C02

Se obtuvo la curva de calibración para la estación de Rumihurco con código C02 con $R^2 = 0.98$, esta ecuación de calibración se comparó con otras curvas de calibración entre suelos del horizonte A (TUA) y 2A (TU2A) pertenecientes a la zona alta de la cuenca Jatunhuayco en Quito que también emplearon el método TDR para obtener los resultados de contenido volumétrico en el agua calibrados (Páez-Bimos et al., 2023). Otra curva presentada es la predeterminada que se obtiene con la ecuación de Topp, los puntos cafés son los valores de generados en laboratorio al sacar las submuestras y su respectiva curva del mismo color es la calibrada para la estación C02, además, los puntos verdes son los valores de permitividad relacionadas con el contenido de humedad volumétrico que se obtuvieron el día de la salida a campo para el muestreo.

Por último, la línea roja entrecortada representa el contenido volumétrico del agua a la que llega el suelo cuando se satura, es decir, es el promedio de las dos muestras saturadas en los anillos

Kopecky que resulta de $0.521 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y el cuadro sombreado de color rosado representa el rango de permitividad histórico registrado por el sensor de EPMAPS.

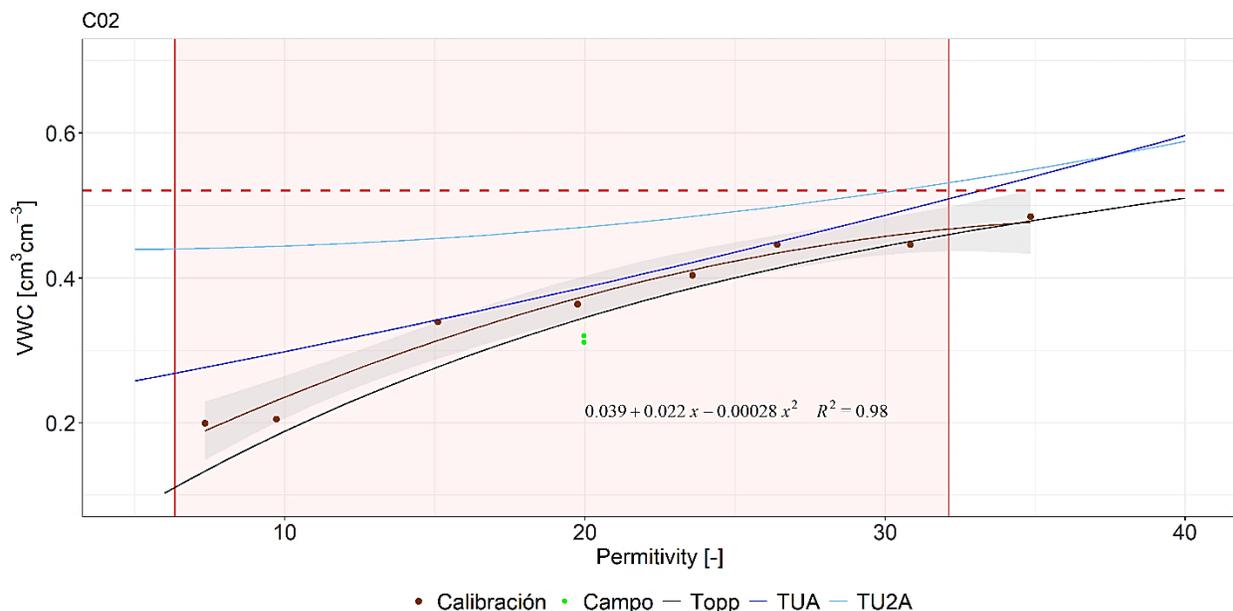


Figura 22. Curva de calibración de la estación Rumihurco.

Fuente: Elaboración propia

4.6 Serie temporal

Con los datos históricos de precipitación, humedad con la ecuación de Topp obtenidos desde mayo del 2022 hasta abril del 2024, se obtiene la figura 23 donde la línea azul representa las variaciones de precipitación diariamente, al igual que la línea negra que son los valores de contenido volumétrico de agua en cm^3/cm^3 obtenidos con la ecuación Topp. La línea café representa los datos de humedad obtenido mediante la ecuación de calibración determinada para el sitio de estudio, mientras la línea roja entrecortada representa el promedio del contenido volumétrico de agua obtenido cuando se saturaron las muestras de suelo inalterada.

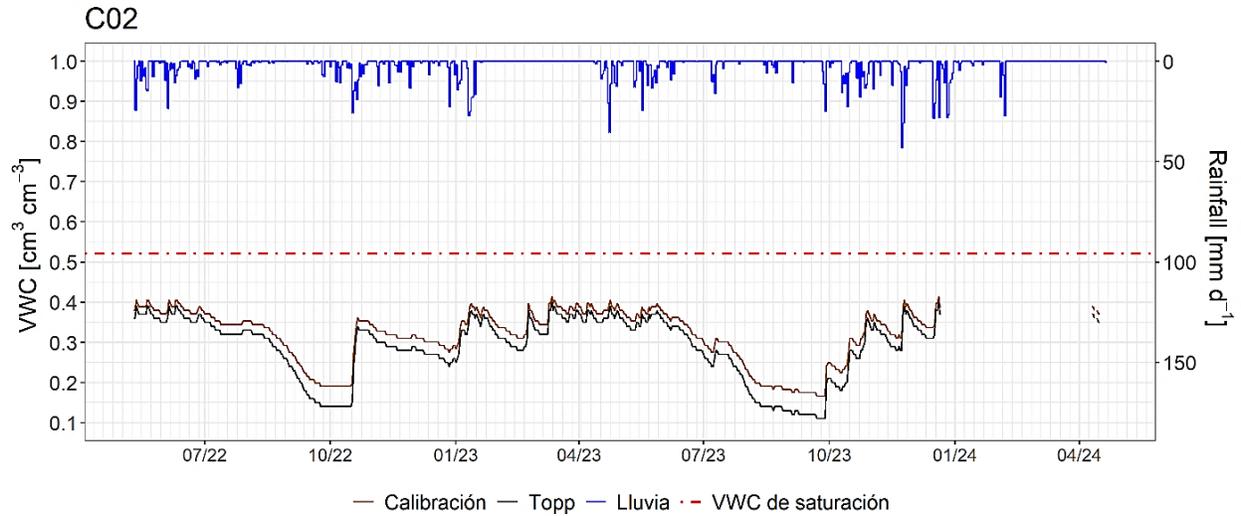


Figura 23. Serie temporal de la estación C02

Fuente: Elaboración propia

Diagrama de bloques

En la figura 24 se presenta un diagrama de bloques con los resultados a los largo del tiempo obtenidos de la humedad del suelo (VWC) aplicando la ecuación de Topp y los obtenidos con la ecuación de calibración específica para el sitio de estudio.

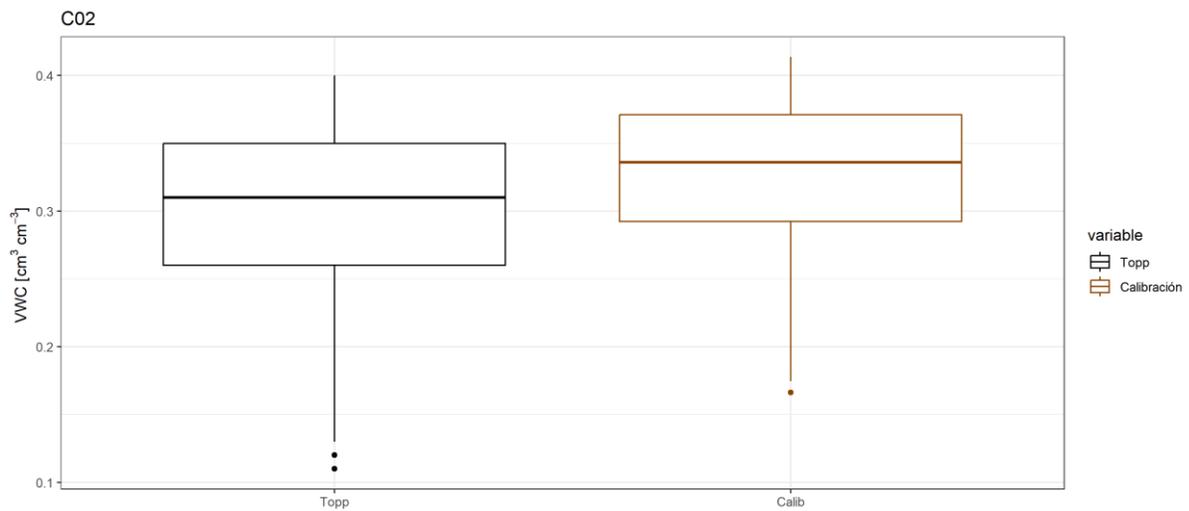


Figura 24. Diagrama de cajas para VWC del suelo

Fuente: Elaboración propia

Datos estadísticos diagrama de cajas

Mediante el diagrama de cajas se presenta en la tabla 19, un análisis estadístico de los datos como los cuartiles, media y mediana de VWC que tiene la ecuación de Topp y la ecuación de calibración específica para comparar los datos obtenidos, en que se observa que el contenido volumétrico de agua es un poco más elevado cuando se obtienen con la ecuación específica del sitio de estudio, en comparación a las obtenidas con la ecuación de Topp.

Tabla 19 Datos estadísticos de VWC histórico en la estación C02

VWC		
	Ecuación de Topp	Ecuación de calibración
1er Cuartil	0.2600	0.2923
Mínimo	0.1100	0.1663
Mediana	0.3100	0.3360
Media	0.2887	0.3179
3er Cuartil	0.3500	0.3710
Máximo	0.4000	0.4136

Fuente: Elaboración propia

4.7 Firma hidrológica

En la figura 25, se presenta una Función de Densidad de Probabilidad (PDF) que visualmente es la distribución de los datos de contenido volumétrico de agua en el suelo obtenidos con la ecuación de calibración para el sensor C02. Se obtuvo una función multimodal con tres picos predominantes y el pico mayor es aproximado a $0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

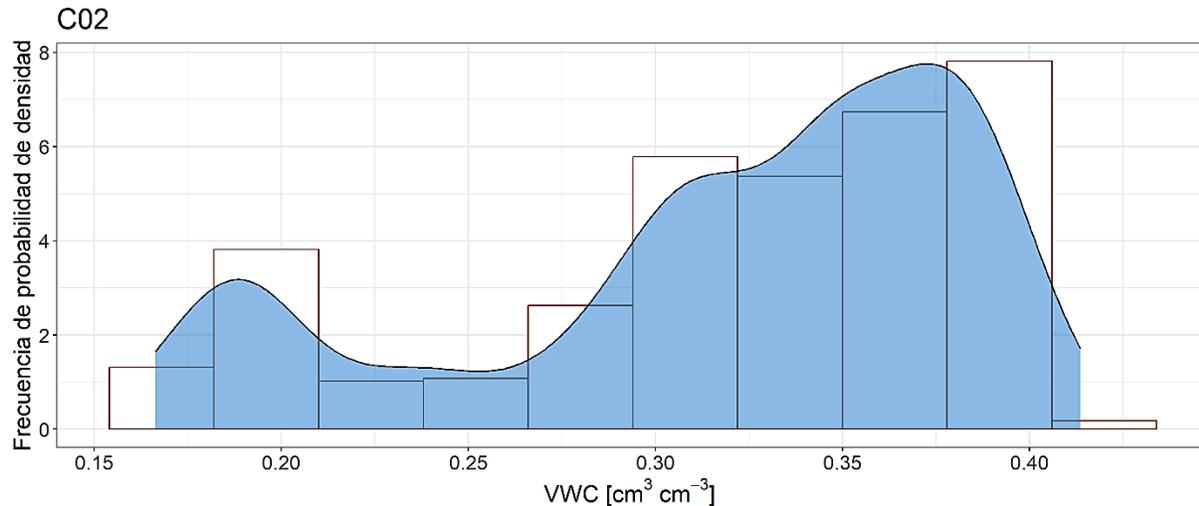


Figura 25 Firma hidrológica de la estación C02

Fuente: Elaboración propia

5 DISCUSIÓN

Las propiedades del suelo de la estación C02 obtenidas en el horizonte A en una profundidad de 30cm , corresponde la composición de la materia orgánica con un carbono orgánico (SOC) de 3.42% y porosidad de 66%, estos valores tienen similitud con las propiedades de otro suelo cercano al sitio de estudio como se presenta en Poulénard et al., (2001) donde el suelo volcánico cercano al volcán Pichincha con altura de 4000msnm y a la misma profundidad de estudio se obtuvo un suelo con 4% de carbono orgánico y porosidad de 64%.

Los valores de porosidad obtenidos presentan valores bajo respecto a suelo con bajo cobertura vegetal natural, es decir, 75% como específica Patiño et al., (2021) “los datos están en un rango de suelos para agricultura y ganadería”, en el caso de la estación Rumihurco se presenciaron zonas de cultivo y ganado aunque no dentro de una gran extensión pueden ser un factor que afecte las propiedades del suelo. En el caso de la densidad aparente se obtuvo 1.01 g/cm^3 , considerada un valor alto por Poulénard et al.,(2001) se obtuvo una densidad aparente de 0.9 g/cm^3 igualmente en un suelo arenoso, este aumento de densidad aparente puede reducir la capacidad de retener agua, provocando un incremento en la escorrentía que repercute en la aceleración de procesos erosivos a una profundidad de estudio de 20 a 40 cm”.

El pH del suelo en la estación es 6.37 ligeramente ácido que caracteriza a suelos dedicados a cultivo como se pudo presenciar en la parte baja de la estación, además el valor es similar al suelo arenoso de horizonte A obtenido por Páez-Bimos et al., (2023) a una profundidad de 35cm de 5.18 pH. Otra propiedad del suelo es respecto a la composición del suelo estudiado que predomina por 55% arena, 42% fino y 3% grava.

Los valores obtenidos con la ecuación de calibración supera el VWC a $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ que, según Vaz et al., (2013) corresponde a suelos minerales con el sensor C616 de la marca Campbell a una profundidad de 20.6 cm, donde se presenció una subestimación de los valores obtenidos con la ecuación de Topp, lo mismo que sucedió en este trabajo. La curva de calibración presentada en la figura 22, muestra que Topp subestima los valores VWC, este resultado se llegaba a esperar debido a que el manual de Campbell Scientific, (2018) sensor CS650 que emplea el método TDR, especifica que los valores obtenidos con la ecuación de Topp presenta valores no precisos para suelos volcánicos, y suelos finos o arenosos.

Otra curva similar a la específica para el suelo es la TUA que representa a un horizonte A con alta materia orgánica (Páez-Bimos et al., 2023). Por último, respecto a las curvas utilizadas para hacer las comparaciones la curva perteneciente al horizonte 2A de Páez-Bimos et al., (2023) no está dentro del espacio de la curva de calibración específica para el suelo, esto puede deberse a que el suelo TU2A se analizó a una profundidad de 30 a 60cm, donde el pH del suelo disminuye y el contenido volumétrico de agua de $0.63 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ parámetros un poco más elevados a los estudiado para la estación C02.

La figura 23, presenta la serie temporal de datos de precipitación en la estación C02, como se puede observar en algunos meses respecto a la disminución de las precipitaciones y como tiene relación con la disminución de la humedad en el suelo, también se presentan algunos picos de humedad que en la serie temporal no tiene una relación a los datos de precipitación, porque desde los meses de febrero hasta inicios de marzo el sensor de la estación C02 presentaba valores cero de precipitación, sin embargo, los valores de humedad se encontraban dentro de los rangos altos, esto puede deberse a un error que registraba el sensor en ese tiempo, porque según Páez-Bimos et al.,(2023) cuando “se obtiene valores altos de humedad en los suelos TU-UP de la cuenca Jatunhuayco, las precipitaciones también eran altas, presentado una relación directa”.

La firma hidrológica muestra la distribución de la función de densidad de probabilidad, en la cual se puede observar tres picos respecto a los datos de humedad, por tanto, según (Araki et al., 2022) se puede clasificar el PDF según el número de picos en la gráfica 25, por tanto se determina como multimodal porque presenta más de dos picos respecto a los datos de humedad del suelo, el pico con mayor probabilidad aproximadamente a $0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ que tiene concordancia con los valores que se presentan en la serie temporal cuando el suelo presenta mayor humedad, seguido por $0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ que son cercanos a los valores obtenidos en campo, mientras el pico con menor probabilidad equivale a $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ asociado a condiciones secas en la estación C02.

La profundidad de análisis en el suelo descarta tener una clasificación unimodal que según Araki et al., (2022) a mayor profundidad se tiene una tendencia unimodal por menos influencia del clima y compactación de porosos en el suelo. Esta firma hidrológica obtenidas con las series temporales, al igual que la realizada por Araki et al., (2022b) presenta interacción entre la capacidad de almacenar agua en el suelo, respecto a sus propiedades físicas y vegetación, además en suelos para uso de cultivo puede aumentar la humedad por transpiración y contenido orgánico, sin embargo, en la estación C02 el suelo ya estaba degradado y solo en la parte baja de la estación se tenía pequeñas extensiones de cultivo.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Las propiedades físicas del suelo como carbono orgánico y porosidad son similares a suelos Andosoles que presentan efectos por el uso en cultivos que puede afectar las propiedades hídricas y erosivas, además la distribución de las partículas corresponde a un suelo arenoso.
- La ecuación de calibración específica en la estación C02 presenta un comportamiento correcto de los datos VWC respecto a los datos de permitividad en el suelo, por tanto, se puede utilizar para sustituir a la ecuación de Topp, si bien ambas curvas tienen una tendencia parecida, los valores obtenidos con la ecuación de calibración presentan valores más altos de VWC que permite hacer un análisis más preciso respecto a la humedad que presenta el suelo.

- La serie temporal presenta como la ecuación de Topp subestima los valores de VWC como en la curva de calibración, mientras que con la ecuación de calibración específica para el suelo de estudio presenta valores más altos, que tienen concordancia con los datos de precipitación porque a mayor presencia de lluvias la humedad también aumenta, mientras en los meses de agosto a octubre de 2023 las precipitaciones fueron mínimas, por tanto, la humedad del suelo también disminuyó.
- En el PDF respecto a la probabilidad de obtener los datos VWC, presenta una distribución multimodal del contenido volumétrico de agua en el suelo estableciendo que existen tres estados que resaltan en la humedad del suelo en la estación C02, estos picos nos permiten entender el comportamiento de humedad.

Recomendaciones

- Para tener un conocimiento más profundo se debe realizar más estudios relacionados a las características de suelo a los alrededores, profundizar las análisis de las características de porosidad para hacer comparaciones respecto al contenido volumétrico del agua exponiendo al suelo en condiciones de saturación en campo.
- Se recomienda realizar el análisis de humedad con los datos que tengan mayor rango de tiempo recolectado de precipitación y humedad, debido a que, los datos en este estudio se realizaron con aproximadamente 2 años de datos proporcionados por EPMAPS, sin embargo, tener más datos permitirá hacer una comparación de resultados.
- Es preferible realizar un monitoreo continuo respecto a que el sensor en la estación esté en funcionamiento y registre los datos, esto permitirá que se disminuyan los datos vacíos en la serie temporal para mejorar la interpretación y comparación de resultados de precipitación y humedad, además que son los datos con los que se obtiene la ecuación de calibración y es fundamental tener una mayor variación de datos.

- Con los datos obtenidos, se recomienda emplear la ecuación de calibración para la estación C02, porque permite obtener datos de humedad específicas al suelo y mejorar la toma de decisiones del recurso hídrico y humedad del suelo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials,. (s. f.). *Traducción de ASTM D4318*.

American Society for Testing and Materials,. (2009). *ASTM D 7263-09*. Pdfcoffee.Com. <https://pdfcoffee.com/astm-d-7263-09-pdf-free.html>

American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D7777 – 13: Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Liquid Petroleum by Portable Digital Density Meter*. <http://archive.org/details/gov.law.astm.D7777.13>

(American Society for Testing and Materials. (2017). *Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos)*. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-del-norte/macanica-de-suelos/normativa-astm-d2487-17/22542859>

American Society for Testing and Materials. (2017a). *Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>

American Society for Testing and Materials. (2017b). *Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17

American Society for Testing and Materials. (2019). *Métodos de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por masa1*. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-tecnologica-del-peru/mecanica-de-suelos/astm-d2216-19-contenido-de-humedad-espanol/27009536>

American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. <https://www.astm.org/d2487-17e01.html>

- American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method*. <https://www.astm.org/d0854-23.html>
- Araki, R., Branger, F., Wiekenkamp, I., & McMillan, H. (2022a). A signature-based approach to quantify soil moisture dynamics under contrasting land-uses. *Hydrological Processes*, 36(4), e14553. <https://doi.org/10.1002/hyp.14553>
- Araki, R., Branger, F., Wiekenkamp, I., & McMillan, H. (2022b). A signature-based approach to quantify soil moisture dynamics under contrasting land-uses. *Hydrological Processes*, 36(4), e14553. <https://doi.org/10.1002/hyp.14553>
- Armijo, F., & Maraver, F. (2006). Granulometría y textura de los peloides españoles. *Anales de Hidrología Médica*, 2006, 1, 79-96.
- Campbell. (2017). *LoggerNet* [Software]. <https://www.campbellsci.es/loggernet>
- Campbell, C. A. (1978). Chapter 5 Soil Organic Carbon, Nitrogen and Fertility. En M. Schnitzer & S. U. Khan (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 8, pp. 173-271). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70020-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70020-5)
- Campbell Scientific. (2018). *CS650 and CS655 Water Content Reflectometers*. https://s.campbellsci.com/documents/ca/manuals/cs650_cs655_man.pdf
- Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Célleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230-239. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>
- Enriquez, A. A. A. (2021). *ESPACIOS VERDES PÚBLICOS, RECUPERACIÓN DE LA QUEBRADA CONDADO ALTO, 2021*.
- Escobar-González, D., Villacís, M., Páez-Bimos, S., Jácome, G., González-Vergara, J., Encalada, C., & Vanacker, V. (2024). Soil Moisture Forecast Using Transfer Learning: An Application in the High Tropical Andes. *Water*, 16(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/w16060832>
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.
- FAO. (2021). *Standard operating procedure for soil pH determination*. 23.

- Fatichi, S., Or, D., Walko, R., Vereecken, H., Young, M. H., Ghezzehei, T. A., Hengl, T., Kollet, S., Agam, N., & Avissar, R. (2020). Soil structure is an important omission in Earth System Models. *Nature Communications*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14411-z>
- Gnann, S. J., Coxon, G., Woods, R. A., Howden, N. J. K., & McMillan, H. K. (2021). TOSSH: A Toolbox for Streamflow Signatures in Hydrology. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104983. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104983>
- Gnatowski, T., Szatyłowicz, J., Pawluśkiewicz, B., Oleszczuk, R., Janicka, M., Papierowska, E., & Szejba, D. (2018). Field Calibration of TDR to Assess the Soil Moisture of Drained Peatland Surface Layers. *Water*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w10121842>
- Hofstede, R., Mena, P., Suárez, E., Anaguano, F., Beltrán, K., & Borja, R. (2023). *Los páramos del Ecuador. Pasado, presente y futuro*.
- Iwasaki, S., Endo, Y., & Hatano, R. (2017). The effect of organic matter application on carbon sequestration and soil fertility in upland fields of different types of Andosols. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63(2), 200-220. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1309255>
- Kassaye, K. T., Boulange, J., Saito, H., & Watanabe, H. (2019). Calibration of capacitance sensor for Andosol under field and laboratory conditions in the temperate monsoon climate. *Soil and Tillage Research*, 189, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.020>
- López, A., Crende, P., & Castelao, A. (2005). Uso del TDR en ensayos de movimiento de agua sobre columnas de suelo inalterado. *VII Jornadas de Investigación en la Zona No Saturada del Suelo: ZNS'05, 2005, ISBN 84-9749-171-8, págs. 109-114, 109-114*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6445703>
- Manna, L. L., Buduba, C., Alonso, V., Davel, M., Puentes, C., & Irisarri, J. (2007). *COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA REGIÓN ANDINO-PATAGÓNICA: EFECTOS DE LA VEGETACIÓN Y EL TIPO DE SUELO*.
- McMillan, H. (2020). *A review of hydrologic signatures and their applications*.
- Ontaneda, D. (2020). *Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta*. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7805/1/T3323-MCCNA-Ontaneda-Efectos.pdf>

- Páez-Bimos, S., Molina, A., Calispa, M., Delmelle, P., Lahuate, B., Villacís, M., Muñoz, T., & Vanacker, V. (2023a). Soil–vegetation–water interactions controlling solute flow and chemical weathering in volcanic ash soils of the high Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(7), 1507-1529. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1507-2023>
- Páez-Bimos, S., Molina, A., Calispa, M., Delmelle, P., Lahuate, B., Villacís, M., Muñoz, T., & Vanacker, V. (2023b). Soil–vegetation–water interactions controlling solute flow and chemical weathering in volcanic ash soils of the high Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(7), 1507-1529. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1507-2023>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*, 202, 105227. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Perrin, J. L., Bouvier, C., Janeau, J. L., Ménez, G., & Cruz, F. (2001). Rainfall/runoff processes in a small peri-urban catchment in the Andes mountains. The Rumihurcu Quebrada, Quito (Ecuador). *Hydrological Processes*, 15(5), 843-854. <https://doi.org/10.1002/hyp.190>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.-L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian *Páramo*: Effect of tillage and burning. *CATENA*, 45(3), 185-207. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Proaño, S. (2024). *CALIBRACIÓN SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO “M5028”*. [PDF].
- Risser, V., & Gallegos, E. D. (1997). *Estudio de los movimientos de tierras en las laderas del Pichincha informe del ano 1996- fdi:010054573- Horizon*. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010054573>
- Rubol, S., Manzoni, S., Bellin, A., & Porporato, A. (2013). Modeling soil moisture and oxygen effects on soil biogeochemical cycles including dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA). *Advances in Water Resources*, 62, 106-124. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.09.016>
- Shukla, M. K. (2013). *Soil Physics: An Introduction*. CRC Press.

- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. (1996). *Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls*. <https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub1374.pdf>
- Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method*. (s. f.). Recuperado 7 de julio de 2024, de <https://www.astm.org/d0854-23.html>
- Thomas, G. E. (2012). *Soil Properties and the Unified Soil Classification System (USCS)*.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Topp, G. C., & Ferre, P. A. (2000). *Measuring water content in soil using TDR: A state-of-the-art in 1998* (1011-4289; pp. 111-124).
- Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., & Tuller, M. (2013). Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. *Vadose Zone Journal*, 12(2), 1-16. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>
- Xi, X., Zhuang, Q., Kim, S., & Gentine, P. (2023). Evaluating the Effects of Precipitation and Evapotranspiration on Soil Moisture Variability Within CMIP5 Using SMAP and ERA5 Data. *Water Resources Research*, 59(5), e2022WR034225. <https://doi.org/10.1029/2022WR034225>
- Zeitoun, R., Vandergeest, M., Vasava, H. B., Machado, P. V. F., Jordan, S., Parkin, G., Wagner-Riddle, C., & Biswas, A. (2021). In-Situ Estimation of Soil Water Retention Curve in Silt Loam and Loamy Sand Soils at Different Soil Depths. *Sensors*, 21(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/s21020447>

8 ANEXOS

Anexo 1. Densidad del agua y coeficiente de temperatura (K) para diversas temperaturas

Temperatura °C	Densidad (g/mL)	Coeficiente de Temperatura (K)	Temperatura °C	Densidad (g/mL)	Coeficiente de Temperatura (K)	Temperatura °C	Densidad (g/mL)	Coeficiente de Temperatura (K)
15	0.9991	1.0009	16	0.998	1.00074	17	0.998	1.00057
0.1	0.99909	1.00088	0.1	0.998	1.00072	0.1	0.998	1.00055
0.2	0.99907	1.00087	0.2	0.998	1.00071	0.2	0.998	1.00054
0.3	0.99906	1.00085	0.3	0.998	1.00069	0.3	0.998	1.00052
0.4	0.99904	1.00084	0.4	0.998	1.00067	0.4	0.998	1.0005
0.5	0.99902	1.00082	0.5	0.998	1.00066	0.5	0.998	1.00048
0.6	0.99901	1.0008	0.6	0.998	1.00064	0.6	0.998	1.00047
0.7	0.99899	1.00079	0.7	0.998	1.00062	0.7	0.998	1.00045
0.8	0.99898	1.00077	0.8	0.998	1.00061	0.8	0.998	1.00043
0.9	0.99896	1.00076	0.9	0.998	1.00059	0.9	0.998	1.00041
18	0.9986	1.00039	19	0.99841	1.0002	20	0.998	1
0.1	0.9985	1.00037	0.1	0.99839	1.00018	0.1	0.998	0.99998
0.2	0.9985	1.00035	0.2	0.99837	1.00016	0.2	0.998	0.99996
0.3	0.9985	1.00034	0.3	0.99835	1.00014	0.3	0.998	0.99994
0.4	0.9985	1.00032	0.4	0.99833	1.00012	0.4	0.998	0.99992
0.5	0.9985	1.0003	0.5	0.99831	1.0001	0.5	0.998	0.9999
0.6	0.9984	1.00028	0.6	0.99829	1.00008	0.6	0.998	0.99987
0.7	0.9984	1.00026	0.7	0.99827	1.00006	0.7	0.998	0.99985
0.8	0.9984	1.00024	0.8	0.99825	1.00004	0.8	0.998	0.99983
0.9	0.9984	1.00022	0.9	0.99823	1.00002	0.9	0.998	0.99981
21	0.997	0.99979	22	0.9977	0.99957	23	0.99754	0.99933
0.1	0.997	0.99977	0.1	0.9977	0.99954	0.1	0.99752	0.99931
0.2	0.997	0.99974	0.2	0.9977	0.99952	0.2	0.99749	0.99929
0.3	0.997	0.99972	0.3	0.9977	0.9995	0.3	0.99747	0.99926
0.4	0.997	0.9997	0.4	0.9976	0.99947	0.4	0.99745	0.99924
0.5	0.997	0.99968	0.5	0.9976	0.99945	0.5	0.99742	0.99921
0.6	0.997	0.99966	0.6	0.9976	0.99943	0.6	0.9974	0.99919
0.7	0.997	0.99963	0.7	0.9976	0.9994	0.7	0.99737	0.99917
0.8	0.997	0.99961	0.8	0.9975	0.99938	0.8	0.99735	0.99914
0.9	0.997	0.99959	0.9	0.9975	0.99936	0.9	0.99732	0.99912
24	0.997	0.99909	25	0.997	0.99884	26	0.9967	0.99858
0.1	0.997	0.99907	0.1	0.997	0.99881	0.1	0.9967	0.99855
0.2	0.997	0.99904	0.2	0.997	0.99879	0.2	0.9967	0.99852
0.3	0.997	0.99902	0.3	0.996	0.99876	0.3	0.9967	0.9985
0.4	0.997	0.99899	0.4	0.996	0.99874	0.4	0.9966	0.99847

0.5	0.997	0.99897	0.5	0.996	0.99871	0.5	0.9966	0.99844
0.6	0.997	0.99894	0.6	0.996	0.99868	0.6	0.9966	0.99842
0.7	0.997	0.99892	0.7	0.996	0.99866	0.7	0.9966	0.99839
0.8	0.997	0.99889	0.8	0.996	0.99863	0.8	0.9965	0.99836
0.9	0.997	0.99887	0.9	0.996	0.9986	0.9	0.9965	0.99833
27	0.99652	0.99831	28	0.996	0.99803	29	0.995	0.99774
0.1	0.99649	0.99828	0.1	0.996	0.998	0.1	0.995	0.99771
0.2	0.99646	0.99825	0.2	0.996	0.99797	0.2	0.995	0.99768
0.3	0.99643	0.99822	0.3	0.996	0.99794	0.3	0.995	0.99765
0.4	0.99641	0.9982	0.4	0.996	0.99791	0.4	0.995	0.99762
0.5	0.99638	0.99817	0.5	0.996	0.99788	0.5	0.995	0.99759
0.6	0.99635	0.99814	0.6	0.996	0.99785	0.6	0.995	0.99756
0.7	0.99632	0.99811	0.7	0.996	0.99783	0.7	0.995	0.99753
0.8	0.99629	0.99808	0.8	0.996	0.9978	0.8	0.995	0.9975
0.9	0.99627	0.99806	0.9	0.995	0.99777	0.9	0.995	0.99747
30	0.9956	0.99744						
0.1	0.9956	0.99741						
0.2	0.9955	0.99738						
0.3	0.9955	0.99735						
0.4	0.9955	0.99732						
0.5	0.9955	0.99729						
0.6	0.9954	0.99726						
0.7	0.9954	0.99723						
0.8	0.9954	0.9972						
0.9	0.9953	0.99716						

Fuente: ASTM D854, (2023)

Anexo 2. Datos de necesarios para la determinación del VWC y Densidad Aparente Seca

Tabla 20. Datos del muestreo en los puntos de calibración

Toma de muestra		Permitividad		Código muestr.	Lugar muestra	Peso suelo húmedo+cap+mue st.	Hora entra al horno	Sale del horno		Peso suelo seco+cap+muestr.	Peso cápsula	Código cápsula	Peso muestr.
Fecha	Hora	P	PA					Fecha	Hora				
8/5/2024	10:33	P	34.828	M2	Superior	131.977	10:36	9/5/2024	11:06	113.563	9.322	S-105	68.095
		PA	4.0068										
8/5/2024	10:38	P	34.8575	M9	Inferior	146.301	10:46	9/5/2024	11:06	124.124	10.479	N6	68.105
		PA	4.3663										
13/05/2024	9:23	P	30.8543	M2	Superior	146.009	9:29	14/05/2024	9:41	125.571	9.686	S-037	68.107
		PA	3.8441										
13/05/2024	9:34	P	30.8277	MT11	Inferior	155.308	9:40	14/05/2024	9:41	135.151	10.36	MG20	73.363
		PA	3.8441										
27/05/2024	10:50	P	26.4141	M8	Superior	141.087	10:56	29/05/2024	11:01	122.194	9.938	L62	68.582
		PA	3.6553										
27/05/2024	11:00	P	26.3907	M3	Inferior	144.933	11:04	29/05/2024	11:01	125.93	9.559	S-105	68.3
		PA	3.6463										
10/6/2024	10:21	P	23.5935	M8	Superior	142.708	10:24	10/6/2024	12:40	125.231	9.093	L62	68.529
		PA	3.5163										
10/6/2024	13:00	P	23.5694	M3	Inferior	138.959	10:30	10/6/2024	12:45	122.24	9.729	L36	68.305
		PA	3.5152										
4/7/2024	11:30	P	19.8015	M1	Superior	145.978	11:35	5/7/2024	11:50	117.004	10.045	S253	69.656
		PA	3.3219										
4/7/2024	11:36	P	19.7034	M2	Inferior	130.929	11:42	5/7/2024	11:51	128.923	9.189	30	68.047
		PA	3.3196										
5/7/2024	11:42	P	15.154	M3	Superior	141.038	11:47	8/7/2024	11:51	126.269	9.89	S150	68.261
		PA	3.1309										
5/7/2024	11:50	P	15.0361	M8	Inferior	141.415	11:53	8/7/2024	11:51	127.426	10.19	L113	68.463
		PA	3.1241										
8/7/2024	12:34	P	9.7207	M5	Superior	131.821	12:39	10/7/2024	12:50	123.057	9.62	L36	69.371
		PA	2.6584										
8/7/2024	12:42	P	9.7096	M4	Inferior	135.009	12:46	10/7/2024	12:50	126.338	9.941	30	67.689
		PA	2.6573										
10/7/2024	11:23	P	7.3495	M2	Superior	128.263	11:28	11/7/2024	11:43	120.027	9.4	L62	68.011
		PA	2.33										
10/7/2024	11:35	P	7.3232	M5	Inferior	131.66	11:40	11/7/2024	11:43	123.02	9.433	N6	69.318
		PA											

Elaboración propia

Anexo 3. Resultados de VWC y de Densidad Aparente

Tabla 21. Resultados de los puntos de calibración

Toma de muestra	Permitividad		Masa suelo húmedo	Masa suelo seco	Masa agua	Contenido gravimétrico de agua	Volumen del muestreador	Densidad aparente	Promedio densidad aparente	VWC	Promedio VWC	Promedio Permitividad
Fecha												
8/5/2024	P	34.828	54.56	36.146	18.414	0.509	41.84	0.86391013	0.976	0.4401	0.485	34.84
	PA	4.0068								0.5298		
8/5/2024	P	34.8575	67.717	45.54	22.177	0.487	41.86	1.08791209				
	PA	4.3663										
13/05/2024	P	30.8543	68.216	47.778	20.438	0.428	41.84	1.14192161	1.086	0.4885	0.446	30.84
	PA	3.8441								0.4038		
13/05/2024	P	30.8277	71.585	51.428	20.157	0.392	49.92	1.03020833				
	PA	3.8441										
27/05/2024	P	26.4141	62.567	43.674	18.89	0.433	42.5	1.02762353	1.083	0.4445	0.447	26.4
	PA	3.6553								0.4502		
27/05/2024	P	26.3907	67.074	48.071	19.003	0.395	42.21	1.13885335				
	PA	3.6463										
10/6/2024	P	23.5935	65.086	47.609	17.477	0.367	42.5	1.12021177	1.084	0.4112	0.404	23.58
	PA	3.5163								0.3961		
10/6/2024	P	23.5694	60.925	44.206	16.719	0.378	42.21	1.04728737				
	PA	3.5152										
4/7/2024	P	19.8015	66.277	37.303	28.974	0.777	42.604	0.87557506	1.055	0.6801	0.364	19.75
	PA	3.3219								0.0479		
4/7/2024	P	19.7034	53.693	51.687	2.006	0.039	41.84	1.23534895				
	PA	3.3196										
5/7/2024	P	15.154	62.887	48.118	14.769	0.307	42.21	1.1399668	1.144	0.3499	0.340	15.1
	PA	3.1309								0.3292		
5/7/2024	P	15.0361	62.762	48.773	13.989	0.287	42.5	1.1476				
	PA	3.1241										
8/7/2024	P	9.7207	52.83	44.066	8.764	0.199	42.6	1.03441	1.034	0.2057	0.205	9.72
	PA	2.6584								0.2047		
8/7/2024	P	9.7096	57.379	48.708	8.671	0.178	42.36	1.14986				
	PA	2.6573										
10/7/2024	P	7.3495	50.852	42.616	8.236	0.193	41.84	1.01855	1.029	0.1968	0.200	7.34
	PA	2.33								0.2028		
10/7/2024	P	7.3232	52.909	44.269	8.64	0.195	42.6	1.03918				
	PA	-										

Elaboración propia

Anexo 4. Script para la generación de curva de calibración en R

```
rm(list = ls())

gc()

Sys.setenv(tz="UTC")

library(xts)

library(zoo)

library(ggplot2)

library(reshape)

library(ggpubr)

library(scales)

library(polynom)

library(ggpmisc)

##2. CALIBRATION EQUATIONS

#####

data_calib<-read.csv("data_calib_vwc_TIC_WL.csv",skip = 0,header=T,
sep=";",stringsAsFactors=FALSE)

my.formula <- y ~ poly(x, 2, raw = TRUE) #polynomic
#my.formula <- y ~ x #linear

data_p = c(5:40)

Topp = (-5.3*10^(-2)) + (2.92*data_p*10^(-2)) - (5.5*data_p^2*10^(-4))+(4.3*data_p^3*10^(-6))

Topp2= data.frame(data_p,Topp)

colnames(Topp2) = c("P","Topp")

TUA = (0.44)-(0.00069*data_p)+(0.00011*data_p^2)
```

```

TUA2= data.frame(data_p,TUA)
colnames(TUA2) = c("P","TUA")

TU2A = (0.22)+(0.0073*data_p)+(5.3*10^(-5)*data_p^2)
TU2A2= data.frame(data_p,TU2A)
colnames(TU2A2) = c("P","TU2A")

#C02
#polynomic
cal_C02 <- data_calib[data_calib$Vegetation=="TU" & data_calib$Horizon=="A",]
plot_C02 <- ggplot(cal_C02,aes(x=Mean.P, y=Mean.VWC, color="darkorange4"))+
  stat_smooth(method="lm", na.rm=T, se=T, fill="gray",
             formula=my.formula,colour="darkorange4", level = 0.95, linewidth=0.5)+
  geom_point(aes(x=F_Mean.P,y= F_Mean.VWC,color="red"), linewidth=2)+
  geom_point(size=c(2), shape=c(19))+
  geom_line(data=Topp2, aes(x = P, y = Topp, color = "Topp")) +
  geom_line(data=TUA2, aes(x = P, y = TUA, color = "TUA")) +
  geom_line(data=TU2A2, aes(x=P, y=TU2A, color="TU2A" ))+
  scale_color_manual(values = c("darkorange4","red", "black","blue","skyblue2"),
                    labels = c("Calibración", "Campo", "Topp","TUA", "TU2A")) +

ylim(0.1,0.7)+
ggtitle("C02")+
xlab("Permittivity [-]") + ylab(expression(paste("VWC [",cm^3, cm^-3,"]",sep = ""))) +
theme_bw()+
theme(plot.title = element_text(size = 16),
      legend.position = c("bottom"),
      legend.title=element_blank(),
      legend.text = element_text(size = 17),

```

```

axis.title.y = element_text(size=17),
axis.title.x = element_text(size=17),
axis.text.y = element_text(size=17),
axis.text.x = element_text(size=17))

m <- lm(my.formula, data.frame("x"=cal_C02$Mean.P,"y"=cal_C02$Mean.VWC))
my.eq <- as.character(signif(as.polynomial(coef(m)), 2))
label.text <- paste(gsub("x", "~italic(x)", my.eq, fixed = TRUE),
  paste("italic(R)^2",
    format(summary(m)$r.squared, digits = 2),
    sep = "~` = `~"),
  sep = "~~~~")

par_tuA <- c(m$coefficients[1],m$coefficients[2],m$coefficients[3])

plot_C02 <- plot_C02 + annotate(geom = "text", x = 20, y = 0.22, label = label.text,
  family = "serif", hjust = 0, parse = TRUE, size = 5)

png(file='calibtdr_C02_20240717.png',width = 4000, height = 2000, res=300)
plot_C02
dev.off()

write.csv(par_tuA,file = "parameters_calib20240214.csv")

```

Anexo 5. Script para la transformar VWC con Topp a permitividad eléctrica.

```

# Instalar y cargar el paquete necesario
if (!requireNamespace("dplyr", quietly = TRUE)) {
  install.packages("dplyr")
}

```

```

}

library(dplyr)

# Leer el archivo CSV
data <- read.csv("EPMAPS_HUMEDAD_LIMPIO_C02.csv")

# Definir la función y su derivada
f <- function(P, VWCTopp) -5.3e-2 + 2.92e-2 * P - 5.5e-4 * P^2 + 4.3e-6 * P^3 - VWCTopp
f_prime <- function(P) 2.92e-2 - 2 * 5.5e-4 * P + 3 * 4.3e-6 * P^2

# Implementar el método de Newton-Raphson para cada valor de VWCTopp
calculate_P <- function(VWCTopp) {
  newton_raphson <- function(P0, tol = 1e-8, max_iter = 100) {
    P <- P0
    for (iter in 1:max_iter) {
      P_prev <- P
      P <- P - f(P, VWCTopp) / f_prime(P)
      if (abs(P - P_prev) < tol) {
        return(P)
      }
    }
    stop("El método de Newton-Raphson no convergió.")
  }
  newton_raphson(0) # Se elige 0 como valor inicial
}

# Aplicar el método a cada valor de VWCTopp
data_result <- data %>%
  mutate(P = sapply(VWCTopp, calculate_P))

```

```
# Guardar los resultados en un nuevo archivo CSV
write.csv(data_result, "EPMAPS_PERMI_C02.csv", row.names = FALSE)
```

Anexo 6. Script para transformar permitividad a VWC calibrado

```
# Importar el archivo csv
datos <- read.csv("EPMAPS_PERMITIVIDAD_DIARIO_C02.20240702.csv")

# Obtener los valores de la columna "Valor"
valores <- datos$P

# Aplicar la ecuación
VWC <- 0.039 + 0.022 * valores - 0.00028 * valores^2

# Crear un nuevo dataframe con los nuevos valores
nuevos_datos <- data.frame(Valor = valores, VWC_Ec_Calib = VWC)

# Guardar el nuevo dataframe en un archivo csv
write.csv(nuevos_datos, "Dat_Calib_Ec_CalibC02.csv")
```

Anexo 7. Script para la generación de series temporales, diagrama de caja y firma hidrológica

```
rm(list=ls())
gc()
Sys.setenv(tz="UTC")

library(ggplot2)
```

```
library(zoo) #time series
library(gridExtra) #plot help
library(ggpubr) #figures
library(scales) #date_breaks
library(reshape) #modify objects
library(grDevices)
```

```
#1. Plot
```

```
#####
```

```
# Set-up
```

```
#####
```

```
start= "05/01/2022 00:00" #input date as format mm/dd/yyyy hh:00
end = "04/30/2024 00:00" #input date as format mm/dd/yyyy hh:00
start= as.POSIXct(start,format = "%m/%d/%Y %H:%M", tz="UTC")
end = as.POSIXct(end,format = "%m/%d/%Y %H:%M", tz="UTC")
```

```
#####
```

```
#1. Plot
```

```
#####
```

```
input_data <- read.csv("datos_20240501.csv", header = T) #load observed values VWC
input_data$Fecha = as.POSIXct(input_data$Fecha,format="%m/%d/%Y")
```

```
#convertir 0 a NA
```

```
input_data$Topp[which(input_data$Topp==0)] = NA
```

```

# plot fig 4
ST_C02 <- ggplot(input_data, aes(x = Fecha)) +
  geom_line(aes(y = Calib, colour = "Calibración"), linetype = "solid", size=0.55) +
  geom_line(aes(y = Topp, colour = "Topp"), linetype = "solid",size=0.55) +
  geom_step(aes(y = (P * -0.005) + 1, colour = "Lluvia"), stat = "identity",size=0.55) +

  geom_hline(aes(yintercept = 0.5215, colour = "VWC saturación"), linetype = "dotdash", size = 0.8) +
  scale_y_continuous(name = expression(paste("VWC [", cm^3, " ", cm^-3, "]", sep = " ")),

    sec.axis = sec_axis(trans = ~(/-0.005) + 200, name = expression(paste("Rainfall [", mm, "
", d^-1, "]", sep = " "))),

    breaks = c(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1), limits = c(0.1, 1)) +

  scale_color_manual(values = c("Calibración" = "darkorange4", "Topp" = "black", "Lluvia" = "blue",
"VWC saturación" = "red"),

    labels = c("Calibración", "Topp", "Lluvia", "VWC de saturación")) +
  xlab(NULL) + ggtitle("C02 ") +

  scale_x_datetime(breaks = scales::date_breaks("3 month"), minor_breaks =
scales::date_breaks("1 week"), date_labels = "%m/%y") +
  theme_bw() +

  theme(plot.title = element_text(size = 20), legend.position = "bottom",
    legend.title = element_blank(), legend.text = element_text(size = 14),
    axis.title.y = element_text(size = 16), axis.text.y = element_text(size = 14),
    axis.title.x = element_text(size = 14), axis.text.x = element_text(size = 12)) +

  guides(colour = guide_legend(override.aes = list(
    linetype = c("solid", "solid", "solid", "dotdash"),
    color = c("darkorange4", "black", "blue", "red"))))

```

```

png(file = 'PC02 _20240626.png', height = 1500, width = 3500, res = 300)

print(ST_C02 )

dev.off()

#BoxPlot

# Filtrar las columnas necesarias ("Topp" y "Calib")
input_data_filtered <- input_data[, c("Fecha", "Topp", "Calib")]

# Melt the data
melt_C02 <- melt(input_data_filtered, id="Fecha")
#####

# Crear el diagrama de cajas
BP_PC02<- ggplot(melt_C02, aes(x = variable, color = variable)) +
  geom_boxplot(aes(y = value)) +
  scale_color_manual(values = c("black", "darkorange4"),
    labels = c("Topp", "Calibración")) +

  xlab(NULL) + ggtitle("C02") +
  ylab(expression(paste("VWC [", cm^3, " ", cm^-3, "]", sep = " "))) +
  theme_bw()

# Guardar el diagrama como un archivo PNG
png(file = 'BoxPlotC02.png', height = 1500, width = 3500, res = 300)
print(BP_PC02)
dev.off()

```

```

# Mostrar estadísticas resumidas
summary(input_data_filtered)

#####

#Histograma C02

H_C02 <- ggplot(input_data, aes(x=Calib)) +
  geom_histogram(aes(y=..density..), colour="darkorange4", fill="white", binwidth=.028) +
  geom_density(alpha=.5, fill="#1874CD") +
  ylab("Frecuencia de probabilidad de densidad") +
  ggtitle("C02") +
  xlab(expression(paste("VWC [", cm^3, " ", cm^-3, "]", sep = " "))) +
  theme_bw() +

  theme(
    plot.title = element_text(size = 20), # Tamaño del título
    axis.title.x = element_text(size = 16), # Tamaño del título del eje x
    axis.title.y = element_text(size = 16), # Tamaño del título del eje y
    axis.text.x = element_text(size = 14), # Tamaño de los textos del eje x
    axis.text.y = element_text(size = 14) # Tamaño de los textos del eje y
  )

png(file='Histograma_C02_20240626.png', height=1500, width=3500, res = 300)

H_C02
dev.off()

```

