

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**CALIBRACIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO CON
VALIDACIÓN DE CAMPO**

**CALIBRACIÓN SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO “PT91” EL
ARENAL**

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

MARÍA FERNANDA HERRERA ARIAS

maria.herrera03@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ph.D. CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS

carlos.paezb@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, MARÍA FERNANDA HERRERA ARIAS 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.

MARÍA FERNANDA HERRERA ARIAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARÍA FERNANDA HERRERA ARIAS, bajo mi supervisión.

Ph.D. CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS
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.

MARÍA FERNANDA HERRERA ARIAS

Ph.D. CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación que enmarca mi esfuerzo y esmero se lo dedico a mis padres Joaquín y Male, por ser el pilar primordial en mi vida, quienes con su ejemplo de sacrificio incansable han sabido guiarme para alcanzar este objetivo.

AGRADECIMIENTO

Es un honor tener este espacio para agradecer a quienes permanecieron conmigo durante esta travesía. Principalmente a Dios y a la Virgencita, por dotarme de salud, inteligencia y sabiduría para alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mis padres Joaquín y Male, por ser la base fundamental que me ha impulsado cada día para superarme, por sus bendiciones, su amor infinito y confianza depositada para enfrentar cada reto que se me ha presentado durante esta etapa, que sepan que sin ellos no lo hubiese logrado.

A mi hermano, por ser mi compañero, por sus palabras de aliento y festejar mis triunfos. A mis abuelitos, por ser mis ángeles en la Tierra, por sus oraciones, sus palabras de cariño, me siento muy orgullosa de ser su nieta.

Agradezco a toda mi familia, a mi pareja y a mis buenos amigos, por su preocupación, buenos deseos y apoyo en los momentos que fueron cuesta arriba.

Un agradecimiento especial al equipo de trabajo del FONAG por la oportunidad de participar en el presente proyecto y al Ph.D. Sebastián Páez Bimos por su dedicación docente e inestimable guía académico.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE ANEXOS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del componente desarrollado	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Marco teórico	4
1.5.1 Propiedades físicas del suelo.....	4
Contenido de agua	4
Densidad volumétrica	4
Gravedad específica.....	5
Porosidad	5
Textura	5
Contenido de materia orgánica	6
pH y conductividad eléctrica	6
Permitividad dieléctrica.....	7
1.5.2 Método TDR	7
1.5.3 Reflectómetro CS650.....	7
Data Logger CR300.....	8
Ecuación de Topp	8
1.5.4 Serie temporal de contenido volumétrico de agua en el suelo	8
2 METODOLOGÍA.....	9

2.1	Sitio de estudio	10
2.2	Muestreo	11
2.2.1	Toma de muestras inalteradas.....	13
2.2.2	Toma de muestras alteradas.....	14
2.3	Propiedades físicas del suelo	15
2.3.1	Contenido de agua en el suelo.....	15
2.3.2	Densidad volumétrica	16
2.3.3	Gravedad específica.....	16
2.3.4	Porosidad	18
2.3.5	Textura - Clasificación SUCS del suelo	18
2.3.6	Contenido de materia orgánica	19
2.3.7	pH y conductividad.....	19
2.4	Determinación de la curva de calibración	19
2.4.1	Instalación de sensores CS650 y muestras grandes inalteradas	20
2.4.2	Saturación de muestras grandes inalteradas.....	22
2.4.3	Determinación del contenido volumétrico de agua en el suelo en función de la permitividad.....	23
2.4.4	Estimación de la curva y ecuación de calibración de sensores CS650 26	
2.5	Series temporales	27
2.5.1	Procesamiento de datos	28
2.5.2	De VWC a permitividad dieléctrica empleando la ecuación de Topp ..	28
2.5.3	De permitividad dieléctrica a VWC empleando las ecuaciones de calibración	28
2.5.4	Gráfico de series temporales	28
2.5.5	Análisis estadístico entre series temporales	29
3	RESULTADOS.....	29
3.1	Propiedades físicas del suelo	29
3.2	Curva de calibración	30
3.3	Series temporales	33
4	Discusión	36
4.1	Propiedades físicas del suelo	37
4.2	Curvas de calibración	38

4.2.1	Curva de calibración PT91-CB.....	38
4.2.2	Curva de calibración PT91-SB.....	39
4.2.3	Curva de calibración PT91-Arenal	40
4.3	Series temporales	41
4.3.1	PT91 – Con Biomanto	41
4.3.2	PT91 – Sin Biomanto	42
5	Conclusiones y recomendaciones	43
5.1	Conclusiones.....	43
5.2	Recomendaciones	44
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
7	ANEXOS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación SUCS de los suelos Fuente: ASMT-D2487 (2017).....	6
Figura 2: Diagrama de metodología Fuente: Elaboración propia	9
Figura 3: Mapa de sitio de estudio. A. Ubicación de los puntos de muestreo dentro del área “El Arenal”. B. Referencia de la proximidad del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACH-A) a centros poblados. C. Localización del ACH-A en Ecuador continental. Fuente: Elaboración propia (2024)	10
Figura 4: El Arenal, área con biomanto como restauración	11
Figura 5: El Arenal, área sin biomanto	11
Figura 6: Inserción del muestreador de PVC en el suelo.....	13
Figura 7: Embalaje y movilización de la muestra al transporte.....	14
Figura 8: Sensor en punto de muestreo PT91-CB	14
Figura 9: Sensor en punto de muestreo PT91-SB.....	14
Figura 10: Sensor en punto de muestreo PT91-SB	20
Figura 11: Diagrama de cableado del reflectómetro CS650 al Data Logger CR300 Fuente: Proaño (2024).....	21
Figura 12: Instalación de muestras en el LEMSUR.....	21
Figura 13: Conexiones de reflectómetros al Datalogger CR300	22
Figura 14: Muestra PT91-CB saturada.....	23
Figura 15: Muestra PT91-SB saturada.....	23
Figura 16: Toma de submuestras inalteradas	25
Figura 17: Retiro de suelo sobresaliente.....	25
Figura 18: Muestra extraída de la parte inferior	25
Figura 19: Submuestra después de 24 h a 110°C.....	25
Figura 20: Saturación de muestras pequeñas inalteradas.....	29
Figura 21: Secado de muestras saturadas a 110°C por 24 h	29
Figura 22: Curva de calibración para el punto de muestreo PT91-CB.....	31
Figura 23: Curva de calibración para el punto de muestreo PT91-SB.....	32
Figura 24: Curva de calibración promedio para el Arenal	32
Figura 25: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-CB, utilizando la ecuación “PT91-CB”	33

Figura 26: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB.....	34
Figura 27: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-CB, utilizando la ecuación “PT91-Arenal”	34
Figura 28: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB, empleando la ecuación de calibración Arenal	34
Figura 29: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-SB, utilizando la ecuación “PT91-SB”	35
Figura 30: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-SB, empleando la ecuación de calibración PT91-SB	35
Figura 31: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-SB, utilizando la ecuación “PT91-Arenal”.....	36
Figura 32: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB, empleando la ecuación de calibración Arenal	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos de muestreo PT91 “El Arenal”	10
Tabla 2: Cronograma de actividades para el día de muestreo, 22 de septiembre de 2023.....	12
Tabla 3: Valores mínimos y máximos de permitividad registrados por el sensor CS616.....	23
Tabla 4: Valores referenciales de permitividad para la toma de submuestras.....	24
Tabla 5: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de la muestra PT91-CB.....	26
Tabla 6: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de la muestra PT91-SB	26
Tabla 7: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de las muestras tomadas en la estación PT91 – El Arenal	27
Tabla 8: Formato de la tabla para generar series temporales de VWC y precipitación	29
Tabla 9: Resultados de ensayos en laboratorio de parámetros físicos	30
Tabla 10: Resumen de fracción de partículas	30
Tabla 11: Ecuaciones de calibración determinadas	33
Tabla 12: Resumen estadístico de los datos de VWC estimados con las ecuaciones de calibración y estándar para el punto PT91-CB	42
Tabla 13: Resumen estadístico de los datos de VWC estimados con las ecuaciones de calibración y estándar para el punto PT91-SB	43

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Tabla de densidad del agua y coeficiente de temperatura “k” a diferentes temperaturas.....	50
ANEXO 2: Código No. 1 de RStudio para visualizar la variación de permitividad hasta la saturación con agua de las muestras grandes inalteradas.	50
ANEXO 3: Código No. 2 de RStudio para la generación de las curvas de calibración	54
ANEXO 4: Código No. 3 de RStudio para el procesamiento de VWC y Precipitación a datos diarios	58
ANEXO 5: Código No. 4 de RStudio para la determinación de la permitividad en función del VWC empleando la ecuación de Topp.....	60
ANEXO 6: Código No. 5 de RStudio para la generación de series temporales de VWC y precipitación	62
Anexo 7: Código No. 6 de RStudio para la generación de diagrama de cajas y parámetros estadísticos.	64
ANEXO 8: Resultados de parámetros físicos y químicos determinados en laboratorio	65

RESUMEN

Este trabajo se centra en el desarrollo de curvas de calibración de dos sensores de humedad del suelo, propiedad del FONAG. Los sensores CS650 de Campbell Scientific que utilizan la ecuación de Topp et al., (1980), han sido instalados en la estación PT91 "El Arenal" en dos sitios (uno con biomanto y otro sin biomanto). La generación de las curvas de calibración se basó en el método de carácter no destructivo TDR (Time Domain Reflectometry), saturando y secando muestras de suelo inalteradas, en las que se insertaron los sensores para leer la permitividad dieléctrica y relacionarla con el contenido volumétrico de agua determinado en laboratorio. Las curvas de calibración obtenidas se las aplicó en series temporales de contenido volumétrico de humedad y se las comparó con los datos históricos registrados por los sensores. En las gráficas se identifica una subestimación del contenido de agua por parte de la ecuación estándar.

Como validación a los resultados y caracterización del suelo en estudio, se realizaron ensayos de propiedades físicas, en las que se encontró tanto para PT91-CB y PT91-SB respectivamente: densidad aparente seca de 1.44 g/cm³ y 1.47 g/cm³, densidad aparente húmeda de 1.68 g/cm³ y 1.72 g/cm³, gravedad específica de 2.609 y 2.517, porosidad de 45% y 42%, materia orgánica de 2.88% y 2.48%, pH de 6.62 y 6.22, textura areno-limosa y contenido gravimétrico de humedad de 17% en ambos puntos de análisis, demostrando así la vulnerabilidad de suelos de páramo al sobrepastoreo de ganado ovino.

PALABRAS CLAVE: Topp, permitividad dieléctrica, contenido volumétrico de humedad, sensores CS650, ecuación de calibración, sobrepastoreo ovino.

ABSTRACT

This work focuses on the development of calibration curves for two soil moisture sensors, property of FONAG. The Campbell Scientific CS650 sensors that use the Topp et al., (1980) equation have been installed at the PT91 "El Arenal" station in two sites (one with biomantle and another without biomantle). The generation of calibration curves was based on the TDR method (Time Domain Reflectometry), it was based on the saturation and drying of unaltered samples. The samples taken were unaltered. The sensors were inserted in the samples to read the dielectric permittivity and relate it to the volumetric water content determined in the laboratory. The calibration curves obtained were applied to a time series of volumetric moisture content and compared with the historical data recorded by the sensors. The graphs identify an underestimation of the water content by the standard equation.

As validation of the results and characterization of the soil under study, tests of physical properties were carried out, in which it was found for both PT91-CB and PT91-SB respectively: dry apparent density of 1.44 g/cm³ and 1.47 g/cm³, wet apparent density of 1.68 g/cm³ and 1.72 g/cm³, specific gravity of 2.609 and 2.517, porosity of 45% and 42%, organic matter of 2.88% and 2.48%, pH of 6.62 and 6.22, sandy-silty texture and gravimetric moisture content of 17% at both point of analysis were found in both sampling point, this demonstrating the vulnerability of paramo soils to overgrazing by sheep.

KEYWORDS: Topp, dielectric permittivity, volumetric water content, CS650 sensors, calibration equation, sheep overgrazing.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del componente desarrollado

El suelo es el recurso más básico, de carácter natural finito, no renovable compuesto de sólidos como minerales y materia orgánica, líquidos y gases (Dixon, 2015). Es el lugar donde interactúan la atmósfera, hidrósfera y litósfera con la biósfera para el soporte de la vida en la Tierra (Shukla M. K., 2014). Aunque el contenido de agua en este compartimiento es solo del 0,05% del agua dulce total de la Tierra, juega un papel fundamental en el control de los ciclos hidrológicos, biogeoquímicos e intercambio de energía en la superficie terrestre (Vereecken et al., 2015). El suelo sirve para la producción de materias primas, alimento, asiento para los seres vivos, de tal forma que influye sobre el medio donde se ubica y repercute en las actividades del ser humano (Burbano-Orjuela, 2016).

El proceso que involucra la transformación de la roca madre en suelo se lo conoce como formación del suelo (Jenny, 1994) y está directamente relacionado con la meteorización. La cual, indica la descomposición o rompimiento de la roca in situ en pequeños fragmentos (Benavides, 2012). Este proceso tiene que ver con la influencia de la temperatura y precipitación como elementos del clima, afectando las tasas de meteorización y crecimiento de microorganismos para la descomposición de materia orgánica (Porta et al., 2019). Asimismo, la topografía influye en la formación tomando control sobre los flujos de agua, profundidad del nivel freático y procesos de erosión y deposición (Páez-Bimos et al., 2022). Finalmente, se tiene como resultado de décadas a miles de años de formación de suelo dependiendo de las condiciones en cada zona.

Uno de los ciclos más importantes para la regulación del clima y la temperatura del planeta, distribución del agua y existencia de la vida misma, es el ciclo hidrológico (Morocho & Chunchu, 2019). Es así como la evapotranspiración devuelve a la atmósfera hasta el 60% de toda la precipitación terrestre (Seneviratne et al., 2010). La humedad del suelo tiene otras relaciones adicionales en los procesos climáticos, como la temperatura del aire, estabilidad en la capa límite e incluso en las precipitaciones (Seneviratne et al., 2010).

La humedad del suelo depende de sus propiedades físicas, áreas geográficas, cubierta vegetal o a su vez actividades antropogénicas como agricultura intensiva o sobrepastoreo. Mediante la investigación de Páez-Bimos et al., (2022) en los páramos del Antisana al Norte del Ecuador se ha podido determinar el comportamiento del agua dependiendo de las características de las raíces. La presencia de raíces menos profundas y más gruesas resulta en suelos con mayor porosidad, agua disponible y conductividad hidráulica, por lo

que los flujos de agua en el horizonte superficial son más altos que en pajonales (Páez-Bimos et al., 2023).

Ubicados a una altura promedio de 3300 m.s.n.m., cubriendo el 7% del territorio nacional ecuatoriano (Morocho & Chunchu, 2019), los páramos actúan como un cuerpo regulador y almacenador de aguas provenientes de la lluvia y niebla (Llambí et al., 2012). Presentan un tipo de suelo llamado Andosol, característico por su color negro, por su estructura porosa, facilitando la infiltración y retención del agua (Llambí et al., 2012).

Este particular ecosistema, donde la interrelación agua-suelo juega un papel fundamental, son los responsables del abastecimiento de agua a la ciudadanía. En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) conserva y recupera las fuentes de agua de cuencas hidrográficas en las provincias de Pichincha y Napo (FONAG, 2020).

Conocer la disponibilidad y contenido de agua en el suelo es realmente importante para las distintas actividades naturales y antropogénicas (Brauman, 2015). Los métodos para estimar el contenido de humedad del suelo se dividen en directas; por medio de la evaporación del agua en una muestra de suelo e indirectas; correlacionando los parámetros del suelo en técnicas dieléctricas, térmicas, neutrónica y medición del potencial matricial del agua en el suelo (Majcher et al., 2020).

El presente trabajo se enmarca en la generación de una curva de calibración por medio del método indirecto TDR haciendo uso de reflectómetros (sensores) CS650 de Campbell Scientific. TDR, es el método de carácter no destructivo, más utilizado para medir la humedad en medios porosos (He et al., 2021). Consiste en la medición del tiempo de propagación de una onda electromagnética en el suelo, lo cual depende selectivamente de su permitividad dieléctrica a granel (Majcher et al., 2020).

1.2 Objetivo general

Calibrar dos sensores de humedad del suelo para el horizonte A para el sitio "PT91" El Arenal propiedad del FONAG, tanto para el suelo con remediación como el original, por medio de la toma de muestras inalteradas y su posterior saturación en laboratorio, con el propósito de establecer sus propias curvas de calibración y generar series temporales de contenido de humedad en el suelo.

1.3 Objetivos específicos

- Tomar muestras alteradas e inalteradas de suelo en el sitio “El Arenal”, para el suelo con remediación y sin remediación, para su análisis físico en laboratorio.
- Medir la permitividad dieléctrica y el contenido volumétrico de agua desde el punto de saturación hasta el secado, en base al refractómetro CS650 de ambas muestras.
- Desarrollar una ecuación de calibración de sensores para cada muestra de suelo.
- Establecer comparaciones a partir de las series históricas de contenido volumétrico de humedad del suelo con la ecuación calibrada y la ecuación estándar.

1.4 Alcance

El estudio se centra en un área específica de los páramos del Antisana, que ha sido vulnerada debido al sobrepastoreo, en la que se establecieron dos puntos de análisis, uno para el suelo con biotextil como remediación y otra para el suelo original afectado. La valoración cuantitativa de este ecosistema es indispensable para el manejo adecuado de cuencas hidrológicas, que proveen servicios ambientales, como es principalmente la regulación y suministro de agua a centros densamente poblados (Páez-Bimos et al., 2022). Resulta esencial disponer de la curva de calibración de sensores de humedad del suelo, ya que, al depender de sus propiedades físicas, refleja la diferencia entre suelos (Llambí et al., 2012).

El método indirecto (TDR) haciendo uso del sensor CS650 proporciona mediciones continuas y en tiempo real a diversas profundidades del suelo (Martínez et al., 2001), lo cual lo convierte en una herramienta grandiosa para aplicaciones agrícolas, de investigación, medioambientales, hidrográficas, ingenieril, etc (Campbell Scientific, 2021). Además, gracias a su cualidad de no ser invasivo sobre el medio, permite tomar decisiones informadas sobre la gestión de riego, planificación de cultivos, distribución de patrones de humedad a diferentes condiciones y propiedades del suelo en estudio (He et al., 2021).

Una vez desarrolladas las curvas de calibración se las aplicará en series temporales de contenido volumétrico de humedad y serán comparadas con series temporales que han empleado la ecuación estándar que utiliza el equipo, la ecuación de Topp et al. (1980). Esto como validación a la ecuación estimada a partir de los análisis realizados y verificar su confiabilidad para que sea una herramienta útil en el monitoreo constante de este recurso por parte del FONAG.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Propiedades físicas del suelo

Los suelos de páramo se reconocen por algunas propiedades como es alta porosidad, baja densidad aparente, alto contenido de materia orgánica y elevada conductividad hidráulica (Páez-Bimos et al., 2022), lo que les da la capacidad de actuar como una esponja por retener importantes cantidades de agua. Sin embargo, las propiedades de este recurso son muy vulnerables a actividades antropogénicas como labranza, ganadería, forestación o quemas (Llambí et al., 2014).

De tal manera que es importante su análisis en laboratorio bajo la toma de muestras alteradas e inalteradas. Las primeras, tomadas con espátulas o palas y depositadas en fundas plásticas cerradas herméticamente y las muestras inalteradas son extraídas intactas del suelo conservando su estructura para lo cual se hace uso de muestreadores kopecky (Méndez, 2022).

Contenido de agua

El contenido de agua en el suelo es la cantidad de agua contenida en una masa o volumen de suelo determinado, el cual representa el porcentaje de humedad (Shukla, 2014). Por una parte, se tiene el contenido de agua gravimétrica, en la cual se determina la cantidad de agua que contiene una muestra de suelo, relacionando la masa de agua por los gramos de suelo seco (Alvarez, 2020). Mientras que, el contenido volumétrico de agua (VWC) es la relación que existe entre el volumen de agua contenida y el volumen total de suelo (Woessner & Poeter, 2020), se lo expresa como cm^3/cm^3 o en porcentaje, también puede ser estimada relacionando la densidad aparente y el contenido gravimétrico de agua (Shukla, 2014).

Densidad volumétrica

La densidad se define masa por unidad de volumen, haciendo mención a la masa de suelo contenida en un volumen específico o muestreador (ASTM, 2021). De modo que el valor correspondiente a la densidad de un suelo en específico depende de su grado de humedad, tal que para su determinación la muestra debe ser inalterada.

La densidad aparente tiene una estrecha relación con el contenido de humedad, cuando existe compactación en el suelo, aumenta la densidad y consigo se afectan las condiciones de retención de humedad (Jiménez & Khalajabadi, 2005).

Gravedad específica

Se define como la relación entre el peso de un volumen de una muestra de suelo y el peso de un volumen igual de agua (Juárez et al., 1972). Este parámetro es utilizado para la determinación de espacios vacíos y el grado de saturación que tiene un suelo (ASTM, 2023).

Porosidad

Según Llambí et al., (2012) la porosidad es la cantidad de volumen libre de sólidos ya sean minerales u orgánicos. Este parámetro aumenta al disminuir el tamaño de las partículas que componen un suelo, como en el caso de arenas el agua se transfiere rápidamente al tener partículas de mayor tamaño a diferencia de suelos arcillosos donde se almacenan importantes cantidades de agua (Shukla, 2014).

Textura

La textura del suelo es una propiedad física permanente, se refiere al porcentaje de las tres fracciones granulométricas, arena, limo y arcilla (Shukla, 2014). Para su determinación, los métodos que se emplean se basan en la individualización de las partículas, con el propósito de medir su diámetro, basándose en la Ley de Stokes (Ticona, 2019).

En este trabajo se emplea la clasificación SUCS (Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería) que caracteriza cualitativamente tanto a la granulometría como a su plasticidad (Garzón et al., 2017). Este sistema clasifica al suelo en tres divisiones según su granulometría y cantidad de materia orgánica (ASTM-D2487, 2017) como se ilustra a continuación.

Criterio para asignación de Símbolo de Grupo y Nombre de Grupo utilizando Pruebas de Laboratorio ^A				Clasificación del Suelo		
				Símbolo del Grupo	Nombre del Grupo ^B	
SUELOS DE GRANULOMETRÍA GRUESA Más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No.4	Gravas Limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3^E$	GW	Grava bien graduada ^F	
		Menos del 5% de fino ^G	$Cu < 4$ y/ó $1 > Cc > 3^E$	GP	Grava mal graduada ^F	
	Arenas 50% ó más de la fracción gruesa pasa la malla No.4	Gravas con Finos Más del 12% de finos ^D	Finos clasificados como ML ó MH	GM	Grava limosa ^{F,G,H}	
			Finos clasificados como CL ó CH	GC	Grava arcillosa ^{F,G,H}	
		Arenas Limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3^E$	SW	Arena bien graduada ^I	
		Menos del 5% de fino ^G	$Cu < 4$ y/ó $1 > Cc > 3^E$	SP	Arena mal graduada ^I	
	Arenas con Finos Más del 12% de finos ^D	Finos clasificados como ML ó MH	SM	Arena limosa ^{F,G,H}		
		Finos clasificados como CL ó CH	SC	Arena arcillosa ^{F,G,H}		
SUELOS DE GRANULOMETRÍA FINA 50% ó más pasa la malla No. 200	Arcillas y Limos Limite líquido menor a 50	Inorgánico	IP > 7 y puntos en ó sobre la línea "A" ^L	CL	Arcilla magra ^{K,L,M}	
			IP < 4 ó puntos debajo de la línea "A" ^J	ML	Limo ^{K,L,M}	
		Orgánico	Limite líquido - secado al horno ₆₀ 0,75	Limite líquido - no secado	OL	Arcilla orgánica ^{K,L,M,N}
	Arcillas y Limos Limite líquido de 50 o más	Inorgánico	IP puntos en ó sobre la línea "A"	CH	Arcilla gruesa ^{K,L,M}	
			IP puntos debajo de la línea "A"	MH	Limo elástico ^{L,M}	
	Orgánico	Limite líquido - secado al horno ₆₀ 0,75	Limite líquido - no secado	OH	Arcilla orgánica ^{K,L,M,P} Limo orgánico ^{L,M,Q}	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	Sobre todo materia orgánica, color negro, y olor orgánico			PT	Turba	

^A Basado en material que pasa la malla de 3" (75 mm).

^B Si la muestra de campo contiene material entre 3" y 12" ó mayor de 12", ó ambos, añadir "con material entre 3" y 12" ó mayor de 12", ó ambos" al nombre del grupo.

^C Gravos con 5 a 12% de finos requieren símbolo doble:

GW-GM grava bien graduada con limo
GW-GC grava bien graduada con arcilla
GP-GM grava mal graduada con limo
GP-GC grava mal graduada con arcilla

^D Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolo doble:

SW-SM arena bien graduada con limo
SW-SC arena bien graduada con arcilla
SP-SM arena mal graduada con limo
SP-SC arena mal graduada con arcilla

$$E \quad C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

^F Si el contenido de arena es $\geq 15\%$, añadir "con arena" al nombre del grupo.

^G Si la clasificación de los finos es CL-ML, usar símbolo doble GC-GM, ó SC-SM.

^H Si los finos son orgánicos, añadir "con finos orgánicos" al nombre del grupo.

^I Si el contenido de grava es $\geq 15\%$, añadir "con grava" al nombre del grupo.

^J Si el punto, de los límites de Atterberg, cae en el área achurada, el suelo es un CL-ML, arcilla limosa.

^K Si el suelo pasa de 15 a 29% la malla No.200, añadir "con arena" ó "con grava", según lo que predomine.

^L Si el suelo que pasa la malla No.200 es $\geq 30\%$, y, es predominantemente arena, añadir "arenoso" al nombre del grupo.

^M Si el suelo que pasa la malla No.200 es $\geq 30\%$, y, es predominantemente grava, añadir "gravoso" al nombre del grupo.

^N IP ≥ 4 y puntos en ó sobre la línea "A"

^O IP < 4 ó puntos debajo de la línea "A"

^P IP puntos en ó sobre la línea "A"

^Q IP puntos debajo de la línea "A"

Figura 1: Clasificación SUCS de los suelos

Fuente: ASMT-D2487 (2017)

Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica Baldocket al., (1999) lo definen como aquellos materiales orgánicos que se encuentran en el suelo y son capaces de descomponerse, especialmente animales y plantas. Para cuantificar la cantidad de materia orgánica, se lo relaciona con el carbono orgánico del suelo (COS) el cual es su principal elemento y es un indicador clave de la calidad del suelo (Izquierdo Bautista & Arévalo Hernández, 2021). El método analítico comúnmente utilizado para su determinación consiste en la obtención de la materia orgánica por calcinación o también conocido como LOI (Loss On Ignition), de igual manera por diferencia de pesos (Izquierdo Bautista & Arévalo Hernández, 2021).

pH y conductividad eléctrica

El pH mide la concentración de iones Hidrógeno en solución de suelo en una escala del 0 al 14, lo cual indica que tan ácido o alcalino es el suelo en contacto directo con el agua (Cremona & Enriquez, 2020). Por lo general, los suelos de páramo son ácidos debido a la presencia de ácidos orgánicos, hidrógeno y aluminio (Llambí et al., 2012). Por otra parte, la conductividad eléctrica mide de forma indirecta la concentración de sales en el suelo en solución (Cremona & Enriquez, 2020).

Permitividad dieléctrica

La permitividad mide la capacidad que tienen ciertos materiales al polarizarse cuando se encuentra en presencia de un campo eléctrico (He et al., 2021). También conocida como “constante dieléctrica” es una medida que representa la capacidad del suelo de almacenar energía eléctrica (Rodríguez, 2020) y está directamente relacionada con el contenido de agua en el suelo (Miyamoto et al., 2003). Según el análisis de Wang & Schmutge (1980) se ha demostrado que, conforme el contenido de agua va aumentando también lo hace la permitividad y que la humedad varía según el tipo o textura del suelo, siendo mayor en suelos arcillosos que en arenosos.

Debido a los métodos de medición electromagnéticos no destructivos como es el TDR (Time Domain Reflectometry, empleado al monitoreo constante de suelos de interés hídrico, el conocimiento de la permitividad dieléctrica del suelo es fundamental para contar con información sobre su contenido de humedad (Behari, 2005).

1.5.2 Método TDR

Time Domain Reflectometry (TDR) es el método de medición electromagnético, indirecto, no destructivo que estima el contenido de agua en tiempo real mediante la lectura de la permitividad dieléctrica del suelo (Souto et al., 2007). Su mecanismo se sustenta en que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas emitidas en el suelo depende exclusivamente de la permitividad dieléctrica (Majcher et al., 2020).

La ecuación de Topp et al. (1980) es utilizada por el modelo para estimar el contenido volumétrico de agua en función de su permitividad; a pesar de que, cuenta con un error estándar de $0.013 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, en algunos suelos es necesaria una calibración específica debido a las particularidades de sus propiedades físicas (He et al., 2021).

1.5.3 Reflectómetro CS650

El CS650 desarrollado por la empresa estadounidense Campbell Scientific, es un sensor inteligente multiparamétrico que permite obtener datos sobre el contenido volumétrico del agua en el suelo (θ_v), conductividad eléctrica a granel y la temperatura (Campbell Scientific, 2021). Consta de dos varillas de acero inoxidable de 300 mm de largo, 3,2 mm de diámetro, separadas entre sí a 32 mm (COTECNO, 2024), con un volumen sensible de 7.5 cm a lo largo de cada varilla y 4.5 cm más allá del final de estas (Campbell Scientific, 2021).

El sensor está configurado como un reflectómetro de contenido de agua, pues un circuito oscilador diferencial está conectado a las varillas. El tiempo que tardan las ondas en ir y

volver varía con el cambio de permitividad dieléctrica (Campbell Scientific, 2021) parámetro que se relaciona directamente con el contenido volumétrico de agua (θ_v) (Topp et al., 1980), entonces, el tiempo de viaje de la onda aumenta al aumentar el contenido de agua y viceversa.

El sensor está diseñado para comunicarse con grabadoras SDI-12, los datos son transferidos al Data Logger CR300 para su posterior procesamiento y registro. De acuerdo con el manual de Campbell Scientific (2021), las varillas sensoras se las inserta verticalmente al suelo, procurando una posición completamente paralela. También, se recomienda enterrar la cabeza del sensor para que esté aislado de las fluctuaciones de temperatura diurnas.

Data Logger CR300

Es un dispositivo que se encarga del registro y almacenamiento de datos medidos por sensores de carácter hidrológicos, meteorológicos, ambientales e industriales (Campbell Scientific, 2023). El data logger trabaja con el software LoggerNet instalado en computadoras para la lectura y descarga de datos para su procesamiento.

Ecuación de Topp

El sensor CS650 trabaja haciendo uso de la ecuación para suelos minerales desarrollada por Topp et al., (1980), la cual relaciona el contenido volumétrico de agua (θ_v) en función de la permitividad dieléctrica (K_a).

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

Su determinación se la realizó de forma experimental en laboratorio analizando suelos con distintas características de textura, densidad, contenido de sal, temperatura; encontrando que la variación del contenido de humedad estaba fuertemente relacionada a cambios de la constante dieléctrica (Topp et al., 1980). Es así como, la ecuación de Topp et al., (1980) describe bastante bien el θ_v para una vasta gama de suelos minerales, no obstante, para suelos orgánicos, volcánicos y de textura fina o con densidades aparentes elevadas los valores de contenido de humedad son subestimados (Campbell Scientific, 2021).

1.5.4 Serie temporal de contenido volumétrico de agua en el suelo

Una serie temporal es una secuencia de N observaciones ordenadas cronológicamente sobre una o varias características de una unidad observable en el tiempo (Mauricio, 2005). Para este trabajo, se grafican las series temporales de contenido volumétrico de agua,

tanto de la ecuación calibrada como la estándar, y se observa su comportamiento en función de la precipitación registrada en la cuenca de Jatunhuayco, específicamente de la estación meteorológica del FONAG JTU01PT11.

2 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, se ha establecido una metodología que abarca la determinación del sitio de estudio, toma de muestras, y su posterior análisis físico en laboratorio, obtención y procesamiento de datos, estimación de la curva de calibración de sensores para medir la humedad del suelo y su aplicación en series temporales de contenido volumétrico de agua y precipitación para su validación.

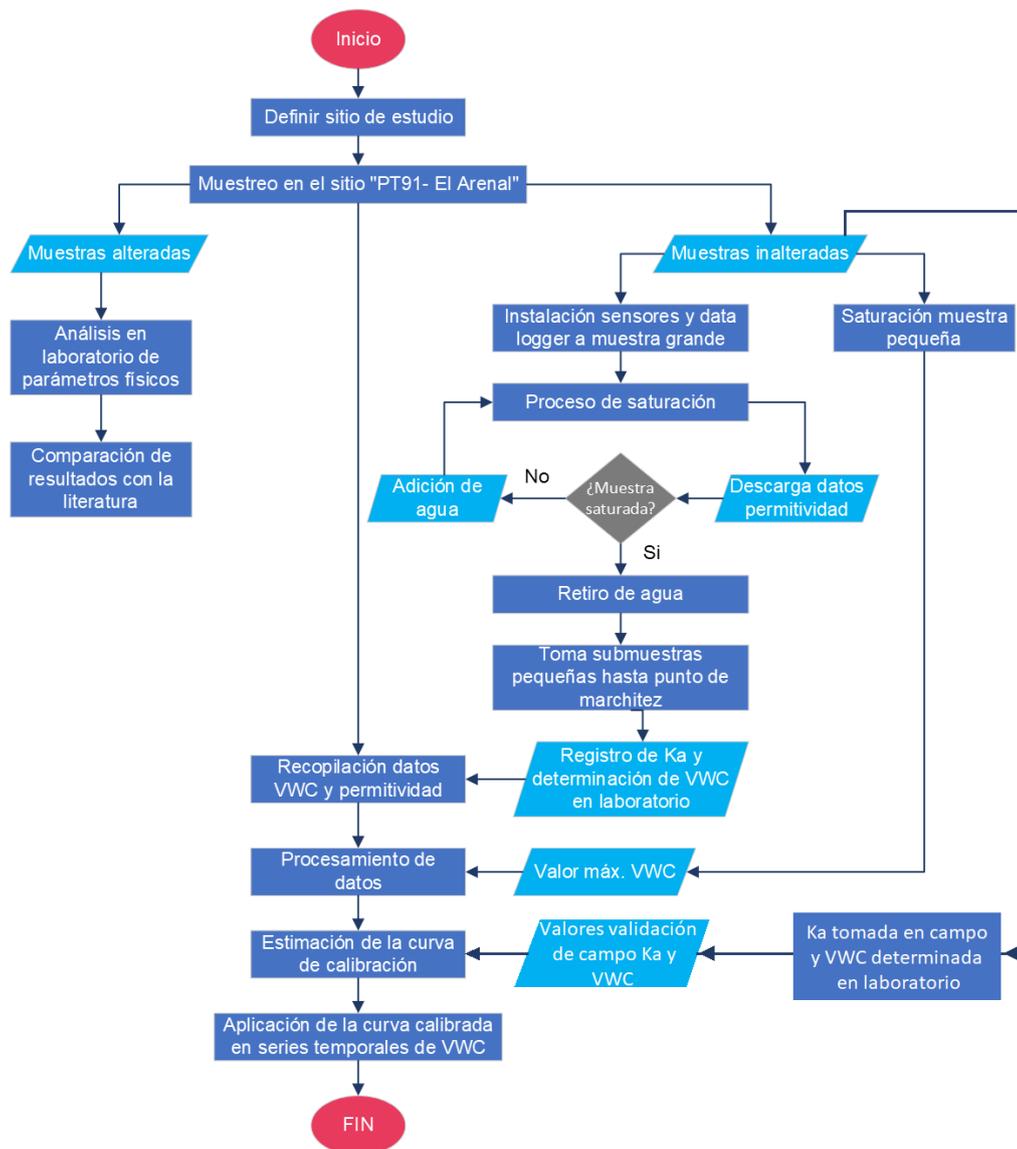


Figura 2: Diagrama de metodología
Fuente: Elaboración propia

2.1 Sitio de estudio

El área de estudio se ubica en la estación hidrometeorológica PT91, propiedad del FONAG, la cual forma parte del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACH-A), en la cuenca del río Jatunhuayco. El lugar es conocido como “El Arenal 1”, por su característico suelo erosionado, compactado y sin vegetación, resultado del sobrepastoreo con ganado vacuno y ovino desde la época colonial (Aguirre et al., 2014a). En el terreno existe una zona delimitada, en la que en el 2014 se aplicó una capa de biomanto utilizando biotextil de sacos de yute como restauración al suelo (Aguirre et al., 2014b).

Por consiguiente, se tomaron dos muestras para realizar la calibración de la curva, una con biomanto (CB) y otra sin biomanto (SB), según las coordenadas de la Tabla 1:

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos de muestreo PT91 “El Arenal”

Punto Muestreo	UTM mE	UTMY mN
PT91-CB	807231	9942696
PT91-SB	807208	9942696

Fuente: Elaboración propia (2024)

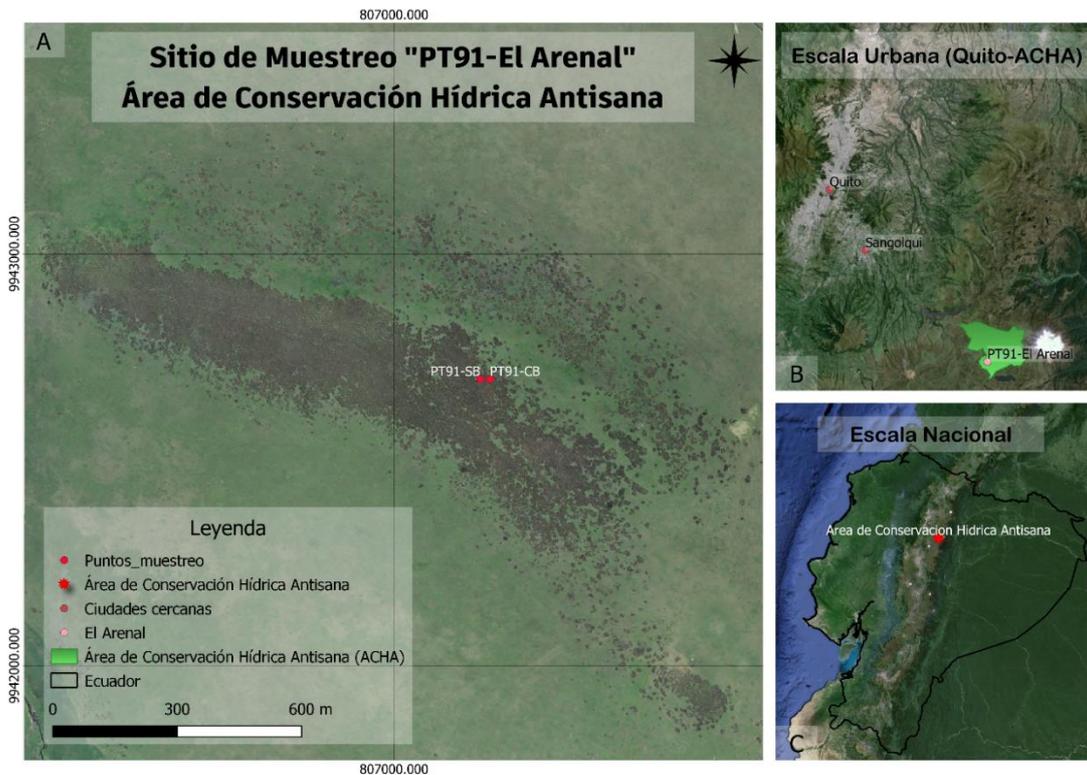


Figura 3: Mapa de sitio de estudio. **A.** Ubicación de los puntos de muestreo dentro del área “El Arenal”. **B.** Referencia de la proximidad del Área de Conservación Hídrica

Antisana (ACH-A) a centros poblados. **C.** Localización del ACH-A en Ecuador continental.

Fuente: Elaboración propia (2024)

La vegetación es bastante escasa o marchita, se puede apreciar especies rastreras creciendo indistintamente y muy separadas, entre ellas *Calamagrostis fibrovaginata* (pajonal), *Festuca andicola*, *Hypochaeris sessiliflora* y *Lupinus microphyllus* (Quinteros, 2017).



Figura 4: El Arenal, área con biomanto como restauración



Figura 5: El Arenal, área sin biomanto

2.2 Muestreo

Junto con el equipo del FONAG y el director del proyecto, se establecieron las fechas y horarios para la salida, las herramientas y equipos necesarios para la toma de muestras alteradas e inalteradas en cada punto.

Tabla 2: Cronograma de actividades para el día de muestreo, 22 de septiembre de 2023

Actividad	Hora inicio	Hora fin
Instalaciones FONAG – Estación PT91 “El Arenal”	6:30 AM	9:30 AM
Toma de muestras alteradas e inalteradas	10:00 AM	2:00 PM
Traslado de muestras al transporte	2:00 PM	3:00 PM
Estación PT91 “El Arenal” – LEMSUR (EPN)	3:00 PM	4:40 PM
Instalación de muestras inalteradas (data logger, sensor y agua)	4:40 PM	5:00 PM

Fuente: Elaboración propia

Las herramientas y equipos utilizados para la extracción de muestras alteradas e inalteradas fueron:

- 2 muestreadores de tubo PVC, 40 cm de diámetro
- 2 muestreadores Kopecky, (100 cm³)
- 1 maso de goma
- 1 tablón
- 1 azadón
- 1 pico
- 2 palas
- 1 serrucho
- 1 sierra
- Fundas ziploc
- Marcadores permanentes

- Rollo de plástico de embalaje

2.2.1 Toma de muestras inalteradas

Las muestras inalteradas constan de:

- Una muestra de suelo utilizando un muestreador de 40 cm de diámetro de tubo PVC.
- Dos muestras de suelo utilizando muestreadores kopecky de 5 cm de diámetro.

Se definieron los puntos de muestreo, en áreas cercanas en donde se encontraban instalados los sensores de humedad del suelo propiedad del FONAG. Para las muestras grandes, se colocó el anillo en el suelo, con ayuda del tablón y el mazo de goma se lo clavó hasta que el muestreador esté completamente enterrado y alineado sus bordes con la superficie. Para su extracción, utilizando el azadón y las palas se retiró el suelo de su alrededor, con el serrucho o la sierra se cortó la parte inferior de la muestra, de forma que no exceda la muestra del volumen del anillo. Se las etiquetó con su nombre, fecha y hora de extracción. Para conservarlas se las embolsó con plástico para su inmediata movilización a la EPN.



Figura 6: Inserción del muestreador de PVC en el suelo



Figura 7: Embalaje y movilización de la muestra al transporte

Para la toma de muestras pequeñas, haciendo uso de los anillos kopecky se muestreó a la misma profundidad que se encontraban los sensores de la estación, paralelo a las varillas de los equipos. La extracción es análoga al procedimiento anteriormente descrito.



Figura 8: Sensor en punto de muestreo
PT91-CB



Figura 9: Sensor en punto de muestreo
PT91-SB

2.2.2 Toma de muestras alteradas

Se tomó 2 kg de suelo alterado de los sitios donde se extrajeron las muestras inalteradas grandes, este fue dispuesto en fundas ziploc, etiquetadas y cerradas herméticamente hasta su posterior análisis en laboratorio. Cabe mencionar que, el suelo muestreado presentaba varias tonalidades en su colorimetría en ambos puntos, lo cual presume la presencia de otro horizonte.

2.3 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas determinadas a partir de las muestras de suelo alteradas e inalteradas son: contenido de agua, densidad volumétrica, gravedad específica, porosidad, clasificación SUCS, contenido de materia orgánica y pH.

2.3.1 Contenido de agua en el suelo

La determinación del contenido gravimétrico de agua en las muestras de suelo se lo realizó bajo la norma ASTM D2216 (2019). El ensayo se lo realizó haciendo uso de las muestras inalteradas tomadas con los anillos Kopecky de cada punto de muestreo. Se inició pesando las muestras en cápsulas para evitar desprendimiento del suelo, se registró el peso húmedo y se las envió al horno a una temperatura de 110°C por 24 horas, hasta obtener una muestra libre de humedad. Se registró el peso seco y haciendo uso de la ecuación (2) se calculó el contenido gravimétrico de agua en porcentaje.

$$\%W = \frac{M_{SH+Cap} - M_{SS+Cap}}{M_{SS+Cap} - M_{Cap}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$\%W$: Contenido gravimétrico de agua, (%).

M_{SH+Cap} : Masa del suelo húmedo y de la cápsula, (g).

M_{SS+Cap} : Masa del suelo seco y de la cápsula, (g).

M_{Cap} : Masa de la cápsula, (g).

Análogo al procedimiento anterior se determinó el contenido volumétrico de agua (θ_v), con la diferencia que para este se hizo uso de la ecuación (3), la misma que relaciona el volumen de agua contenida sobre el volumen total, que en este caso sería el volumen del anillo Kopecky.

$$\theta_v = \frac{V_{H2O} (cm^3)}{V_{TS} (cm^3)} \quad (3)$$

Donde:

θ_v : Contenido volumétrico de agua, (cm³/cm³).

V_{H2O} : Volumen de agua contenido en la muestra de suelo, (cm³).

V_{TS} : Volumen total del suelo, (cm³).

2.3.2 Densidad volumétrica

La densidad de los suelos está definida por la densidad aparente húmeda y seca de una muestra de suelo inalterada (ASMT, 2021). Para la determinación de este parámetro en ambos puntos de muestreo, se siguió el método B “Metodología directa, forma cilíndrica” establecida en la norma ASMT (2021).

Densidad aparente húmeda

El ensayo consistió en pesar la muestra inalterada con su muestreador (kopecky) y se registró la masa en gramos. Por diferencias de pesos se obtuvo la masa de suelo húmeda y utilizando la siguiente ecuación de la norma ASMT D7263 (2021) se obtuvo la densidad aparente húmeda.

$$\rho_t = \frac{M_{SH}}{V_{muestreador}} \quad (4)$$

Donde:

ρ_t : Densidad húmeda, (g/cm³).

$V_{muestreador}$: Volumen interno del muestreador (cm³), 100 cm³

Densidad aparente seca

Una vez obtenido el valor de la densidad aparente húmeda y el contenido de humedad, el valor de la densidad aparente se calculó en base a la norma ASMT D7263 (2021) siguiendo la ecuación (5):

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\%W}{100}} \quad (5)$$

Donde:

ρ_d : Densidad aparente seca, (g/cm³).

ρ_t : Densidad húmeda, (g/cm³).

$\%W$: Contenido de agua gravimétrico, (%).

2.3.3 Gravedad específica

La determinación de la gravedad específica se la realizó bajo los procedimientos de la norma ASTM, D0854-23 (2023) los cuales cubren a muestras de suelos que hayan pasado el tamiz de 4.75 mm con ayuda de un matraz volumétrico como picnómetro.

Primero, se secó las muestras alteradas a 110°C por 24 horas, luego se tamizó la muestra seca por el tamiz No. 4 y se pesó 100 g de suelo resultante. Con ayuda de la balanza analítica se pesó y registró el peso del matraz de 500 ml; luego, se lo aforó con agua destilada y se registró su peso total. En el mismo matraz seco se colocaron los 100 g de suelo con ayuda de un embudo y se aforó con agua destilada, procurando que no queden remanentes en las paredes del instrumento.

A la solución se la sometió a una extracción de aire usando una bomba de vacío, hasta que ya no se observen burbujas en la mezcla. Con la balanza se pesó la masa del matraz, el agua y el suelo en condiciones anóxicas y se registró el valor. Como último paso, se midió la temperatura de la solución utilizando un termómetro de mercurio.

Para los cálculos, primero se obtiene la masa del picnómetro y agua destilada a la temperatura que se realizó el ensayo por medio de la ecuación (6) y con aquel resultado se emplea la ecuación (7) para obtener la gravedad específica. Para calibrar el resultado a 20°C, se hace uso de la ecuación (8) la cual relaciona el valor experimental con el coeficiente de temperatura (k). Los valores para k a diferentes temperaturas se encuentran en el Anexo 1.

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t}) \quad (6)$$

Donde:

$M_{pw,t}$: masa del picnómetro y agua a temperatura del ensayo, (g).

M_p : masa del picnómetro, (g).

V_p : volumen del picnómetro, (ml).

$\rho_{w,t}$: densidad del agua a temperatura del ensayo, (g/ml).

$$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} \quad (7)$$

Donde:

G_t : gravedad específica, (g/g)

M_s : masa de sólidos del suelo seco, (g).

$M_{pws,t}$: masa del picnómetro, agua destilada y suelo en condiciones anóxicas, (g).

$$G_{20^\circ C} = G_t * k \quad (8)$$

2.3.4 Porosidad

La porosidad fue calculada con la ecuación (9), la cual relaciona la densidad aparente con la densidad de partículas 2.65 g/cm^3 (Shuckla, 2014). Se utilizó la densidad aparente seca estimada anteriormente con la ecuación (5).

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\delta_r}\right) * 100 \quad (9)$$

Donde:

n: porosidad, (%).

δ_r : densidad de partículas, (g/cm^3).

2.3.5 Textura - Clasificación SUCS del suelo

La metodología empleada para la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) se basó en la norma ASTM-D2487 (2020). La cual permitió la clasificación granulométrica de las partículas de muestras de suelo alteradas tomadas en ambos puntos de muestreo.

El procedimiento parte en secar la muestra de suelo en el horno a 105°C por 24 horas con el fin de eliminar el agua. Posteriormente, se tamizó la muestra a través de los tamices: 3/8", No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100, No. 200 y la bandeja, se pesó y determinó el porcentaje retenido en cada tamiz. Con los datos obtenidos se generó la curva de granulometría, la cual se define como el porcentaje pasante versus la abertura del tamiz (mm).

Luego, se determinó si la muestra del suelo es fina (pasa más o igual del 50% el tamiz No. 200) o gruesa (menos del 50% pasa por el tamiz No. 200). A su vez, se determinó el porcentaje de partículas: finas (porcentaje que pasa el tamiz No.200), arena (porcentaje que pasa el tamiz No. 4 pero no el tamiz No. 200) y grava (porcentaje que pasa el tamiz 3") (ASTM-D2487, 2020).

Finalmente, para clasificar al suelo e identificar a qué grupo pertenece se hizo uso de la Tabla 1 "Soil Classification Chart" de la norma ASMT D2487 (2020) que se encuentra en el inciso 2.1.5. No se pudo realizar la prueba de límite líquido que forma parte de esta norma, porque el tipo de suelo analizado por simple inspección se trata de arenas, lo cual corresponde a ser "no plástico".

2.3.6 Contenido de materia orgánica

El método contemplado para este parámetro fue “LOI” (Loss On Ignition) o calcinación. Se basa en determinar el porcentaje de materia orgánica, por medio de la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a temperaturas que van hasta los 600°C en una mufla por 2 horas (Eyherabide et al., 2014). El ensayo se lo realizó por duplicado para cada muestra, en el LDIA de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN.

Siguiendo el procedimiento de Gerenfes et al., (2022), se vertió 10 g de suelo en crisoles previamente desecados por 24 horas. Luego, con ayuda de pinzas de laboratorio se tomaron los crisoles y se los llevó a la estufa a 105°C por 24 horas para retirar la humedad, se enfriaron en un desecador y se pesaron en una balanza analítica registrando los pesos secos, luego fueron calcinados a 550°C en la mufla por 2 horas. Finalmente, se los enfrió en el desecador y se registraron los pesos finales. El porcentaje de materia orgánica (%MO) se obtiene por medio de la ecuación (10) de Schulte & Hopkins (2015):

$$\%MO = \frac{\text{Peso suelo a } 105^{\circ}\text{C (g)} - \text{Peso suelo a } 550^{\circ}\text{C (g)}}{\text{Peso suelo a } 105^{\circ}\text{C (g)}} * 100 \quad (10)$$

Carbono Orgánico del Suelo

La materia orgánica está constituida por compuestos de carbono, por lo que según Van Bemmelen el parámetro denominado como Carbono Orgánico representa por lo general el 58% de la MO.

2.3.7 pH y conductividad

El pH y conductividad del suelo fue medido por medio de una sonda de vidrio multiparamétrica OAKTON, según el estudio de Páez-Bimos et al., (2023) en una solución 1:5 de suelo:agua. Para el ensayo, se pesó 4 g de suelo y se los vertió en un vaso de precipitación, en el mismo se añadió 16 ml de agua destilada y se agitó la mezcla vigorosamente. Una vez homogenizada la solución, se esperó un lapso de 30 min para estabilizar la parte acuosa y se introdujo el electrodo, se registró el valor marcado en la pantalla del equipo.

2.4 Determinación de la curva de calibración

2.4.1 Instalación de sensores CS650 y muestras grandes inalteradas

Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Cortando el plástico de la parte inferior, se las colocó en tinas plásticas de 50 cm de diámetro, se tapó con plástico negro la parte superior para evitar evaporación del agua contenida en el suelo y se vertió agua hasta la mitad del calado de las tinas, de forma que el líquido sea absorbido por el suelo en forma ascendente.

Los muestreadores cuentan con un agujero en su parte lateral con el objetivo de insertar las varillas del sensor CS650. El manual de los sensores CS650 Y CS655 Water Content Reflectometers (2021) recomienda la inserción de las varillas del reflectómetro al suelo lo más paralelo posible para una mayor precisión en las mediciones. Las dimensiones de los anillos de PVC son 40 cm de diámetro por 30 cm de altura, de modo que disponen un volumen suficiente para que no interfiera al volumen sensible ocupado para la medición de la permitividad dieléctrica de los suelos muestreados.



Figura 10: Sensor en punto de muestreo PT91-SB

Los reflectómetros CS650 fueron conectados al Data Logger CR300 de Campbell Scientific bajo la guía del diagrama de cableado que señala el programa LoggerNet como se muestra en la Figura 11.

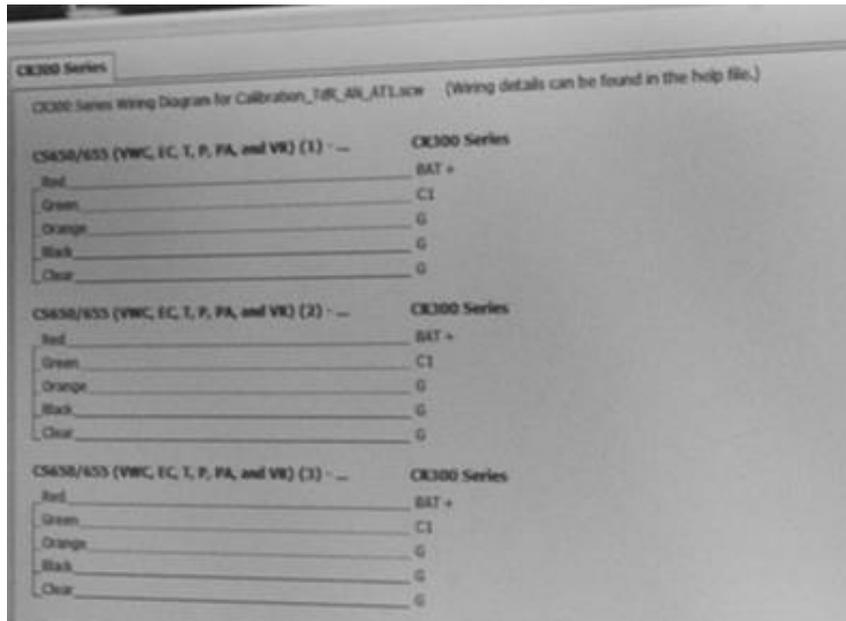


Figura 11: Diagrama de cableado del reflectómetro CS650 al Data Logger CR300

Fuente: Proaño (2024)

Es importante hacer énfasis en que las conexiones de los cables de los reflectómetros al Data Logger sean firmes y correctas para asegurar mediciones sin interferencias y evitar pérdida de datos.



Figura 12: Instalación de muestras en el LEMSUR



Figura 13: Conexiones de reflectómetros al Datalogger CR300

2.4.2 Saturación de muestras grandes inalteradas

Una vez instalado los equipos a las muestras de suelo, se añadió agua conforme se observaba que la muestra iba absorbiendo el líquido. Para verificar su proceso hasta la saturación, los datos de permitividad eléctrica medidos por los reflectómetros eran descargados por medio del programa LoggerNet de Campbell Scientific y leídos mediante el programa RStudio haciendo uso del código 1 detallado en el Anexo 2.

Tras alcanzar la saturación, es decir, verificar que los valores de permitividad no sigan en aumento, se procedió a retirar el agua de las tinas donde se asentaban las muestras, asimismo como los plásticos negros que se encontraban en la parte superior. Esto con el objetivo de iniciar el proceso de remoción del agua en el suelo desde su saturación hasta el punto de marchitez, para la determinación del contenido volumétrico de humedad en función de la caída de la permitividad eléctrica.



Figura 14: Muestra PT91-CB saturada



Figura 15: Muestra PT91-SB saturada

2.4.3 Determinación del contenido volumétrico de agua en el suelo en función de la permitividad

Para establecer el período de submuestreo a las muestras grandes inalteradas se utilizó los rangos de permitividad otorgados por el FONAG establecidos en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores mínimos y máximos de permitividad registrados por el sensor CS616

Estación	Permitividad	
	Mínima	Máxima
PT91 – El Arenal	24.31519	29.81066

A partir de estos datos por medio de la ecuación (11) se determinó el intervalo de permitividad a la cual se tomaron las submuestras, dividiendo la diferencia entre el máximo y mínimo valor de permitividad para el número de muestras extraídas más el valor mínimo de permitividad.

$$Ka_i = i * \frac{Ka_{max} - Ka_{min}}{6} + Ka_{min} \quad (11)$$

Donde:

Ka_i : permitividad eléctrica para cada submuestra.

Ka_{max} : permitividad máxima.

Ka_{min} : permitividad mínima

i : número de veces que se suma la diferencia de rangos, $i = \{1,2,3,4,5,6\}$.

Los valores referenciales para la toma de submuestras se presentan en la Tabla 4, siendo su intervalo entre sí de 0.92.

Tabla 4: Valores referenciales de permitividad para la toma de submuestras

i	Ka_i
1	25.23
2	26.15
3	27.06
4	27.98
5	28.89
6	29.81

Fuente: elaboración propia

Acto seguido, se estimó el peso y volumen de cada uno de los muestreadores metálicos a emplearse en la extracción de las submuestras inalteradas. Para lo cual, haciendo uso de una regla digital se tomaron los diámetros internos en dos ubicaciones diferentes y las alturas cada 120° alrededor del cilindro, el volumen se lo calculó empleando la ecuación (12) y se lo hizo con las dimensiones promedio.

$$V_{muestreador} = \pi * \frac{\emptyset^2}{4} * h \quad (12)$$

Donde:

\emptyset : diámetro, (cm)

h : altura, (cm)

Se verificó que los datos máximos de permitividad en ambas muestras no llegaron al límite máximo entregado por el FONAG, tal que el submuestreo se lo realizó conforme la permitividad arrojada iba disminuyendo con el pasar de los días, procurando tomar las muestras sin intervalos de permitividad muy lejanos.

Las muestras inalteradas se las tomó por duplicado, una en la parte superior y otra en la parte inferior en el mismo agujero de la primera, en un volumen externo al volumen sensible de medición de los reflectómetros. Para extraer las submuestras, se registró el valor de permitividad, los anillos se insertaron en la muestra grande y con un mazo de goma se lo clavó hasta enterrarlo completamente, procurando no compactar el suelo. Luego, con la

sierra se retiró el suelo sobresaliente del anillo, se lo asentó en cápsulas pequeñas para evitar pérdidas de muestra y se registró el peso del suelo húmedo, el muestreador y la cápsula. Posteriormente, se la envió al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas según la norma D2216 de ASTM (2019). Pasado este lapso, se registró el peso del suelo seco, el muestreador y la cápsula.



Figura 16: Toma de submuestras inalteradas



Figura 17: Retiro de suelo sobresaliente



Figura 18: Muestra extraída de la parte inferior

Nota: Por su coloración se presume que el suelo muestreado no pertenece al horizonte A



Figura 19: Submuestra después de 24 h a 110°C

Nota: Después del secado no se observó disminución en su volumen

Según el libro Soil Physics de Shuckla (2014) el contenido volumétrico de agua (VWC) fue estimado con la ecuación (xx), la cual relaciona el volumen de agua con el volumen total de suelo. Para obtener el volumen de agua se hizo uso de las ecuaciones (13) y (14).

$$M_{H_2O} = M_{SHT} - M_{SST} \quad (13)$$

$$V_{H2O} = \frac{M_{H2O}}{\rho_{H2O}} \quad (14)$$

Donde:

M_{H2O} : Masa de agua contenida en la submuestra, (g).

M_{SHT} : Masa de suelo húmedo, muestreador y cápsula, (g).

M_{SST} : Masa de suelo seco, muestreador y cápsula, (g).

V_{H2O} : volumen de agua, (cm³).

ρ_{H2O} : densidad del agua, (1g/cm³).

2.4.4 Estimación de la curva y ecuación de calibración de sensores CS650

Con los datos recopilados anteriormente, se construyeron las Tablas 6 y 7, las cuales contienen información de la fecha de los submuestreos, el promedio del contenido volumétrico de agua y permitividad de los resultados de las submuestras tomadas en la parte superior e inferior de la muestra grande, además los valores de permitividad y contenido volumétrico de agua tomados en campo para su validación.

Tabla 5: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de la muestra PT91 -CB

No.	Date	MEAN VWC	MEAN P	F_DATE	F_MEAN VWC	F_MEAN P
1	13/11/2023	0.435	19.870	22/9/2023	0.215	11.390
2	15/11/2023	0.392	12.750	12/6/2024	0.367	21.82
3	28/11/2023	0.358	10.179			
4	12/12/2023	0.274	9.225			
5	9/1/2024	0.223	7.385			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de la muestra PT91 -SB

No.	Date	MEAN VWC	MEAN P	F_DATE	F_MEAN VWC	F_MEAN P
1	13/11/2023	0.427	26.460	22/9/2023	0.268	14.535
2	15/11/2023	0.386	23.470	12/6/2024	0.311	17.385
3	21/11/2023	0.335	20.170			
4	28/11/2023	0.325	10.300			
5	12/12/2023	0.241	8.540			
6	9/1/2024	0.156	5.890			

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores "MEAN VWC, MEAN P" corresponden a los datos tomados en laboratorio, mientras que los valores "F_MEAN VWC, F_MEAN P" corresponden a los datos recopilados en campo.

Sumando a esto, se construyó la Tabla 7 en la que se recopilan los datos de ambos puntos de muestreo, con la intención de realizar un análisis en conjunto y generar una ecuación de calibración de este modo.

Tabla 7: Datos de contenido volumétrico de agua y permitividad de las muestras tomadas en la estación PT91 – El Arenal

No.	Date	MEAN VWC	MEAN P	F_DATE	F_MEAN VWC	F_MEAN P
1	13/11/2023	0.427	26.460	22/9/2023	0.268	14.535
2	13/11/2023	0.435	19.870	22/9/2023	0.215	11.390
3	15/11/2023	0.386	23.470	12/6/2024	0.367	21.820
4	15/11/2023	0.392	12.750	12/6/2024	0.311	17.385
5	21/11/2023	0.335	20.170			
6	28/11/2023	0.358	10.179			
7	28/11/2023	0.325	10.300			
8	12/12/2023	0.274	9.225			
9	12/12/2023	0.241	8.540			
10	9/1/2024	0.223	7.385			
11	9/1/2024	0.156	5.890			

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 5, 6 y 7 fueron guardadas en archivos CSV por separado. Utilizando el programa RStudio a través del Código No. 2 (véase Anexo 3), se leyeron los datos, se ejecutó los comandos y se generó la curva de calibración con su respectiva ecuación polinómica de segundo grado, la cual contiene los valores de contenido volumétrico de agua en el suelo versus la permitividad emitida por los sensores CS650.

Adicionalmente, con el fin de comparar los resultados se graficaron otras ecuaciones de calibración de suelos con características similares, como las de Vaz et al., (2013) para suelos minerales, orgánicos y arenosos. También, se comparó con las ecuaciones para suelos de páramo del Antisana correspondientes al horizonte A, estimadas por Páez-Bimos et al., (2023), con la ecuación de calibración para el suelo de la estación M5028 estimada por Proaño (2024) y con la ecuación estándar que es usada por los sensores CS650 la ecuación de Topp (Campbell Scientific, 2021).

2.5 Series temporales

Como aplicación de las curvas de calibración obtenidas de cada punto de muestreo y de los dos puntos juntos, se graficó las series temporales con datos históricos de contenido volumétrico de agua y datos de precipitación de la cuenca Jatunhuayco registrados en la estación JTU01PT11. Los datos fueron entregados por funcionarios del FONAG por medio

de correo electrónico, puesto que para la estación PT91 no se encuentran disponibles en la plataforma de la organización.

2.5.1 Procesamiento de datos

Los datos de contenido volumétrico de agua (VWC) fueron entregados en formato "DAT", para lo cual se los pasó a un archivo CSV en el que se verificaron datos cada 5 minutos desde el 12 de agosto de 2015 hasta las 13:55 del 16 de marzo de 2022 y datos horarios desde las 15:00 del 16 de marzo de 2022 hasta las 10:00 del 22 de septiembre de 2023. Mientras que los datos de precipitación se presentaron en horas en un archivo CSV.

Por consiguiente, mediante el Código No. 3 (véase Anexo 4) empleado en RStudio, se transformó los datos de VWC cada 5 minutos a datos horarios por medio del promedio para cada hora, se los unió con el archivo horario y a ambos se los transformó a datos diarios empleando el promedio para cada día. De igual manera los datos horarios de permitividad fueron transformados a datos diarios, sumando los datos horarios para cada día.

2.5.2 De VWC a permitividad dieléctrica empleando la ecuación de Topp

Con el archivo de datos diarios de VWC se empleó el Código No. 4 (véase Anexo 5) en RStudio aplicando el método de Newton-Raphson, en el que calcula la permitividad dieléctrica del suelo por medio de la ecuación de Topp (Campbell Scientific, 2021). Se ingresó el archivo CSV con los valores diarios de VWC en una columna y el programa devuelve otro archivo con los datos de permitividad en la columna siguiente para cada VWC.

2.5.3 De permitividad dieléctrica a VWC empleando las ecuaciones de calibración

Con los valores de permitividad obtenidos previamente, se hizo uso del software Microsoft Excel, tal que aplicando las ecuaciones de calibración PT91-CB, PT91-SB y PT91-Arenal se obtengan los valores de VWC calibrados, cada uno en un nuevo archivo CSV.

2.5.4 Gráfico de series temporales

El gráfico de series temporales históricas se basa en plasmar los datos diarios del contenido volumétrico de agua, tanto de los valores por defecto entregados por el FONAG como los valores calibrados y observar cómo influyen en ellos los datos diarios de precipitación en el tiempo. Para este fin, se hizo uso del Código No. 5 (véase Anexo 6) en

el que se corrió un archivo CSV bajo el formato de la Tabla 8 como se muestra a continuación:

Tabla 8: Formato de la tabla para generar series temporales de VWC y precipitación

TIEMPO	RAIN	VWC_Ec_calib	VW_Topp
12/8/2015	0	0.31	0.24

Fuente: Elaboración propia

Además, para corroborar los máximos valores de VWC graficados, se saturó una muestra pequeña inalterada tomada en muestreadores kopecky para cada punto de análisis. De la cual, una vez saturada se la mantuvo por 24 horas a 110°C para determinar su contenido volumétrico de agua, siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 2.4.3.



Figura 20: Saturación de muestras pequeñas inalteradas



Figura 21: Secado de muestras saturadas a 110°C por 24 h

2.5.5 Análisis estadístico entre series temporales

A partir de los datos diarios históricos del VWC entregados por el FONAG y determinados a partir de las ecuaciones de calibración, por medio del código No. 6 (véase Anexo 7) en el programa RStudio se generó valores estadísticos como promedio, mediana, cuartiles y diagramas de cajas, con el fin de comparar datos similares, identificar patrones o tendencias entre ambas series.

3 RESULTADOS

3.1 Propiedades físicas del suelo

Los valores de las propiedades físicas y químicas presentadas a continuación son resultado de los ensayos realizados en los laboratorios LEMSUR y LDIA de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN. A simple vista se observa que los datos obtenidos en ambos puntos de muestreo tienen una baja dispersión entre sí. Los valores empleados para su procesamiento hasta su presentación en la Tabla 9, se encuentran detallados en el Anexo 8.

Tabla 9: Resultados de ensayos en laboratorio de parámetros físicos

Parámetro	Unidad	PT91-CB	PT91-SB
Contenido gravimétrico de agua	%	17	17
Contenido volumétrico de agua	cm ³ /cm ³	0.37	0.31
Densidad aparente húmeda	g/cm ³	1.68	1.72
Densidad aparente seca	g/cm ³	1.44	1.47
Gravedad específica, G _{s20°C}	-	2.609	2.517
Porosidad	%	45	42
Clasificación SUCS	-	Arena-limosa (SM)	Arena-limosa (SM)
Plasticidad	-	No plástico	No plástico
Contenido de materia orgánica	%	2.88	2.48
Carbono orgánico del suelo	%	1.67	1.44
pH	-	6.62	6.22
Conductividad eléctrica	μs/cm ³	0.08	0.085

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Resumen de fracción de partículas

Fracción	PT91-CB	PT91-SB
Grava (%)	1	3
Arena (%)	57	62
Finos (%)	42	35

Fuente: Elaboración propia

3.2 Curva de calibración

En las Figuras 22, 23 y 24 se presentan las gráficas de VWC [cm³/cm³] vs permitividad dieléctrica, en las que se muestran las curvas de calibración con su respectiva ecuación polinómica para estimar el VWC a partir de la permitividad dieléctrica detectada por los

reflectómetros CS650. Adicionalmente, se graficó la ecuación estándar de Topp utilizada por los sensores CS616 (propiedad del FONAG), las ecuaciones para suelos minerales, orgánicos y arenosos estimadas por Vaz et al., (2013) en las que emplearon sensores CS616 para determinar el contenido volumétrico de agua, la ecuación de calibración para la estación M5028 (propiedad del FONAG) estimada por Proaño (2024) ubicada cerca de los páramos del Antisana y las ecuaciones de calibración de Páez-Bimos et al., (2023) para los horizontes A (TUA) y 2A (TU2A) ubicadas en la cuenca de Jatunhuayco.

A su vez, los puntos negros fueron generados por medio de la estimación de VWC determinado en laboratorio y la lectura de permitividad registrada por los reflectómetros, mismos que definen la curva de calibración. Y los puntos rojos corresponden a los valores registrados en campo.

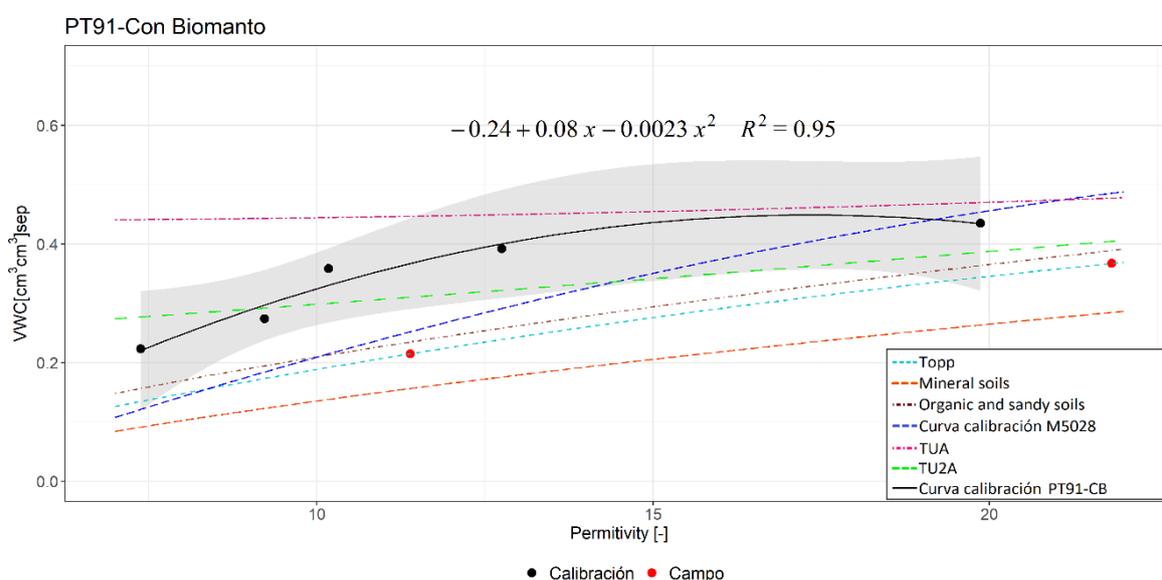


Figura 22: Curva de calibración para el punto de muestreo PT91 -CB

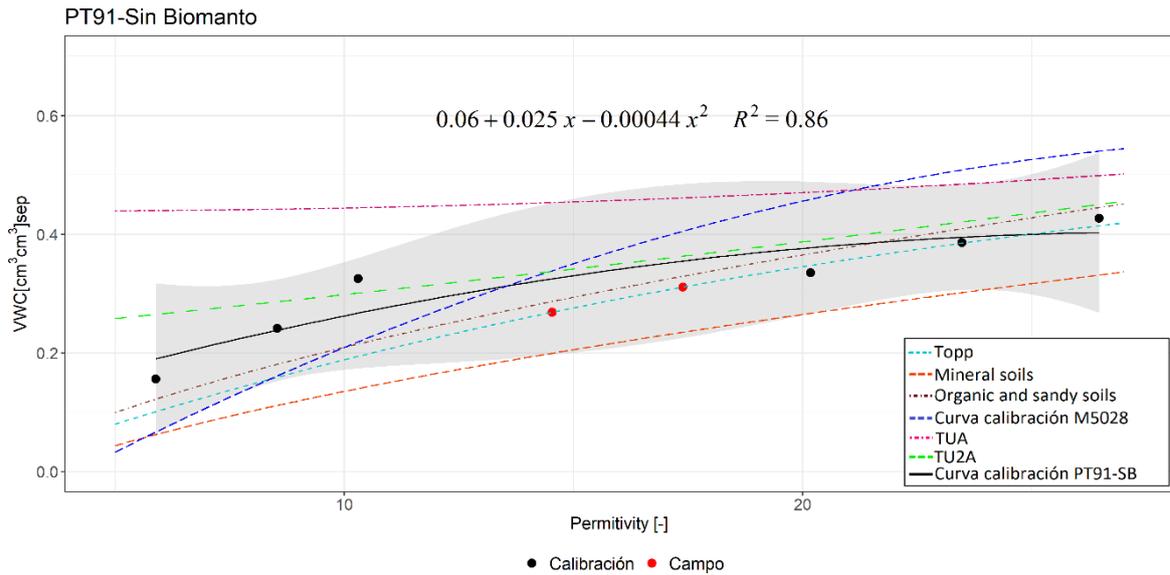


Figura 23: Curva de calibración para el punto de muestreo PT91-SB

La Figura 24 muestra la curva de calibración en función de los datos obtenidos de los dos puntos de muestreo, de igual manera se compara su tendencia con las curvas anteriormente descritas.

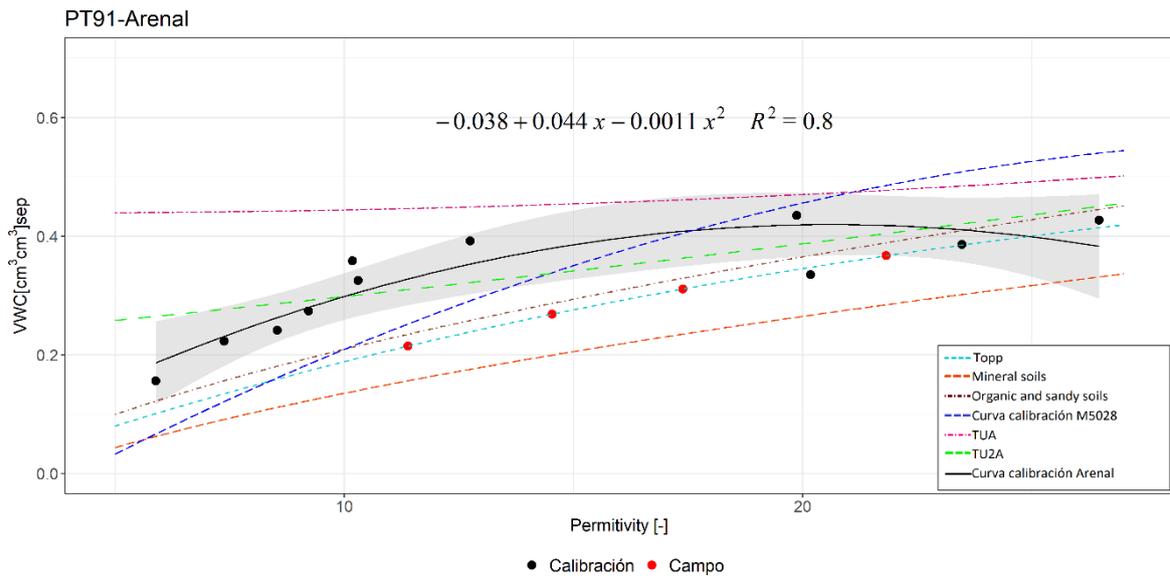


Figura 24: Curva de calibración promedio para el Arenal

En la siguiente tabla se presentan las 3 ecuaciones determinadas en laboratorio.

Tabla 11: Ecuaciones de calibración determinadas

Nombre	Ecuación
PT91-CB	$-0.24 + 0.08x - 0.0023x^2$
PT91-SB	$0.06 + 0.025x - 0.00044x^2$
PT91-Arenal	$-0.038 + 0.044x - 0.0011x^2$

Fuente: Elaboración propia

3.3 Series temporales

A continuación, se muestran las gráficas con datos históricos de contenido volumétrico de agua haciendo uso de los datos entregados por el FONAG, de color negro los que usan la ecuación de Topp y de color marrón los valores obtenidos mediante las ecuaciones de calibración resultantes descritas en el inciso 3.2, la línea horizontal roja muestra el valor de saturación de agua en el punto de análisis respectivo. Además, para ambos puntos se empleó la ecuación de calibración “Arenal”, la cual describe el comportamiento de humedad en promedio. En la parte superior de la gráfica se expone los valores de permitividad registrados en la estación JTU01PT11. También, se presenta un diagrama de cajas para visualizar la distribución en conjunto de los datos estimados.

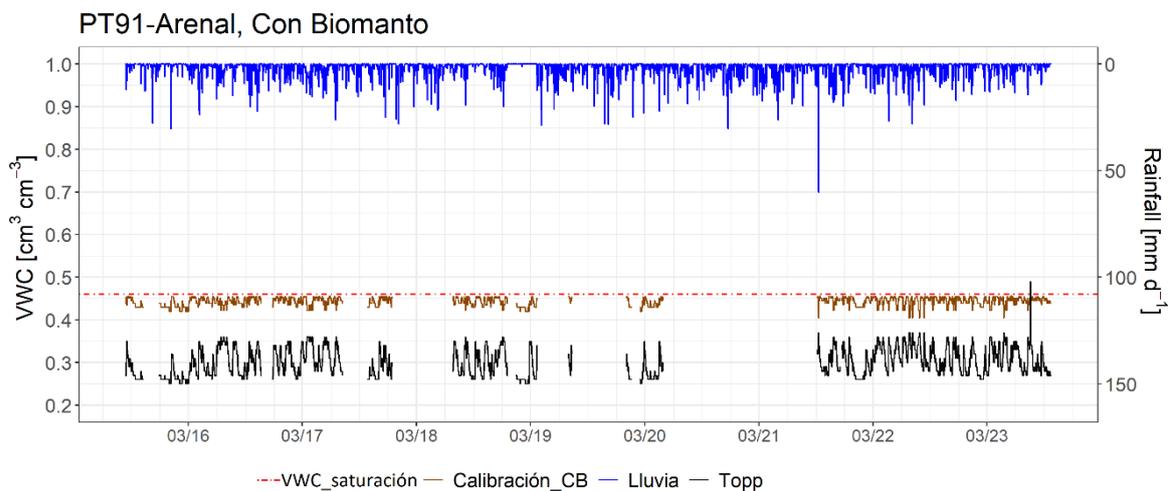


Figura 25: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-CB, utilizando la ecuación “PT91-CB”

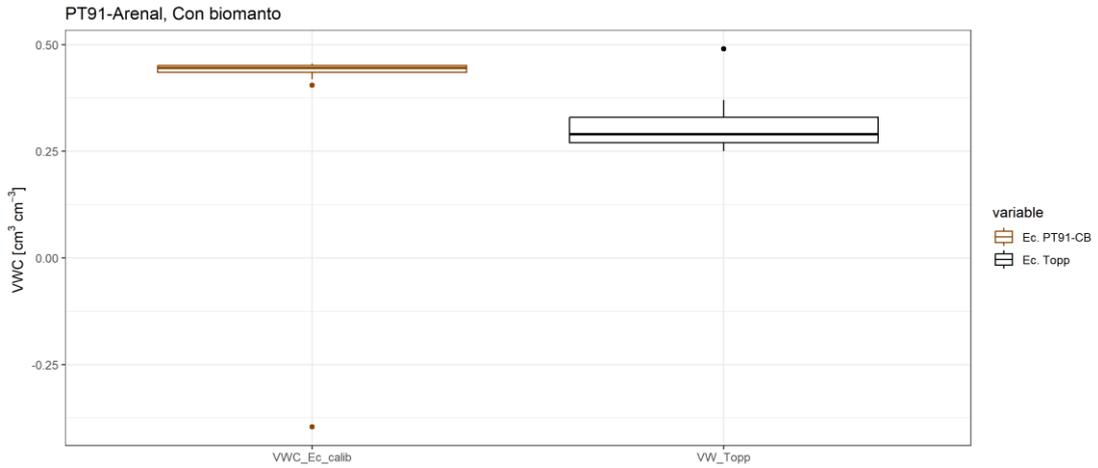


Figura 26: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB

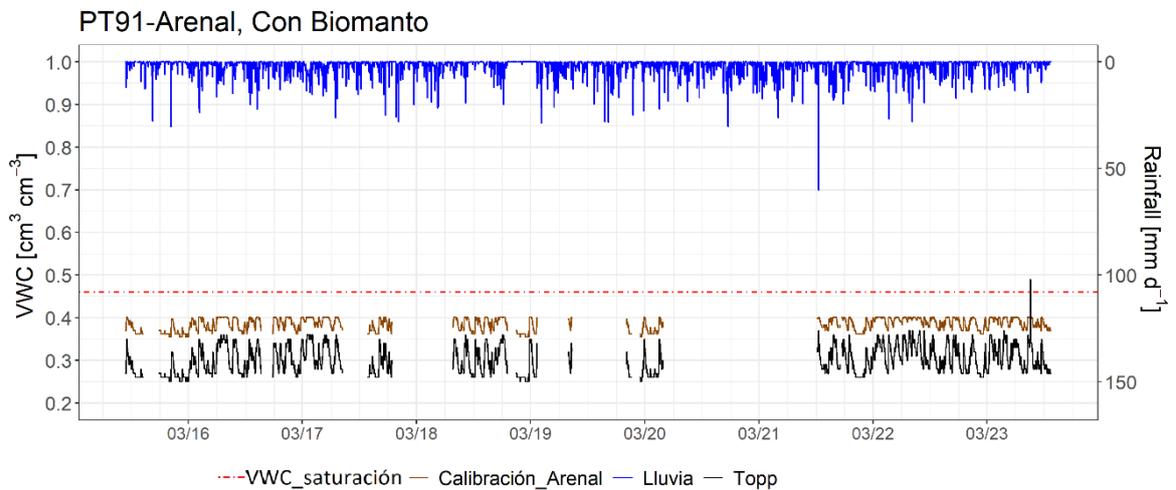


Figura 27: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-CB, utilizando la ecuación "PT91-Arenal"

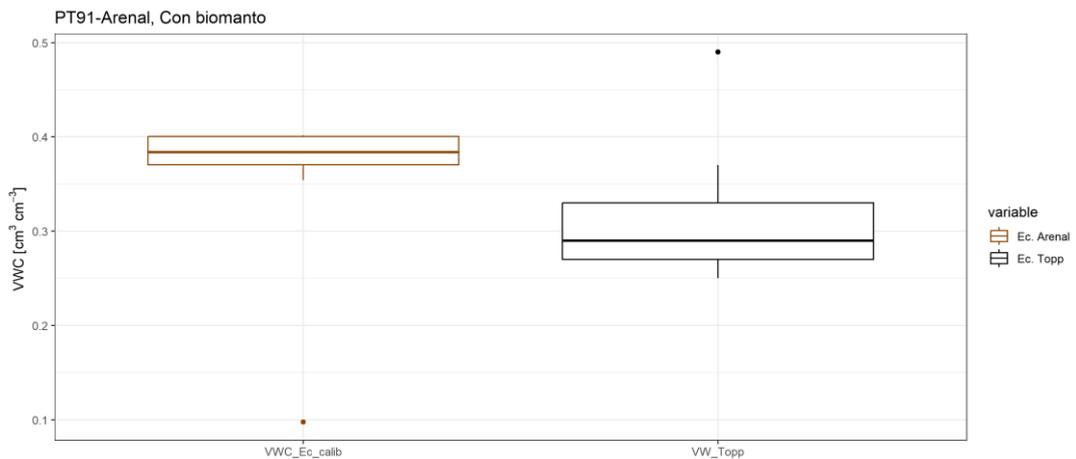


Figura 28: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB, empleando la ecuación de calibración Arenal

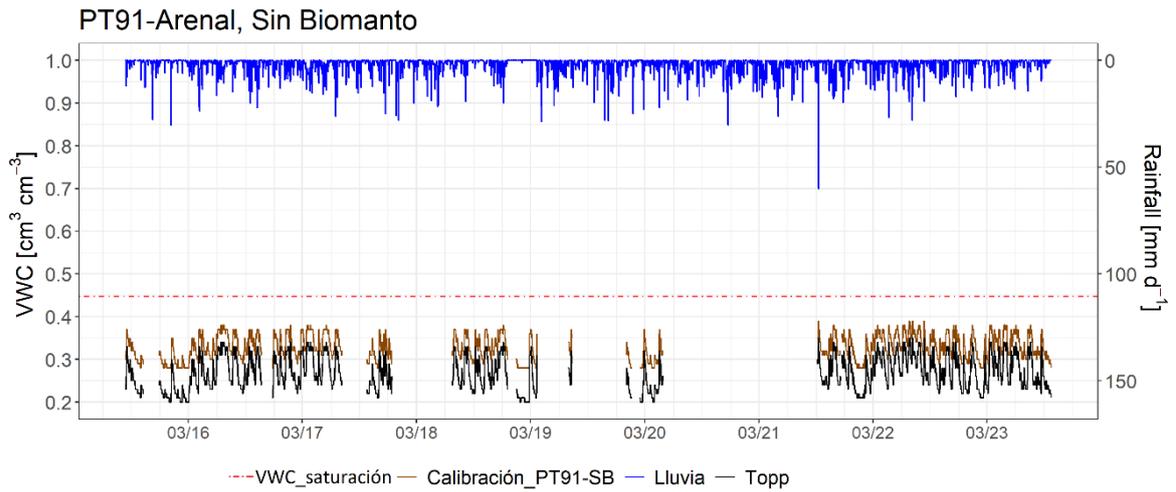


Figura 29: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-SB, utilizando la ecuación “PT91-SB”

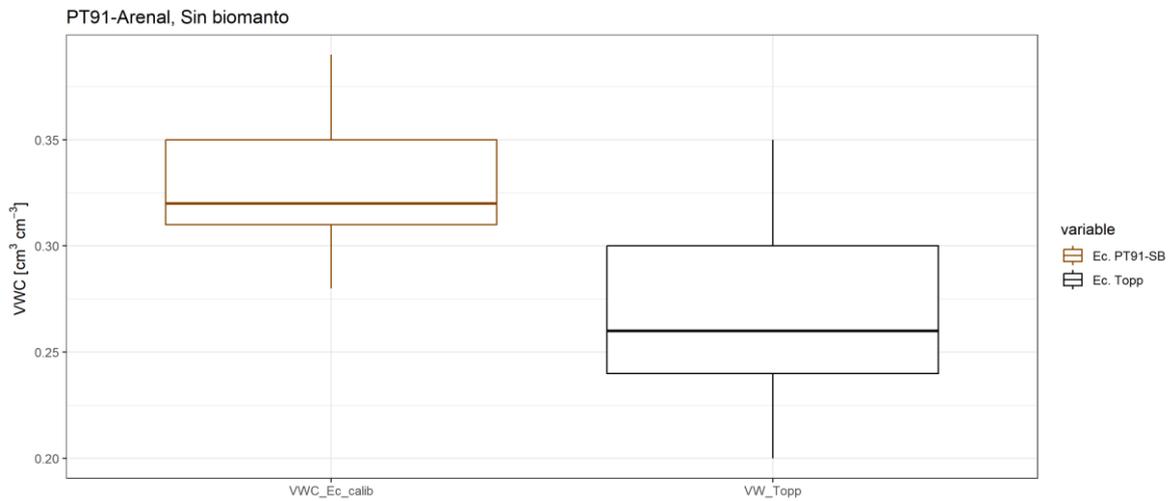


Figura 30: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-SB, empleando la ecuación de calibración PT91-SB

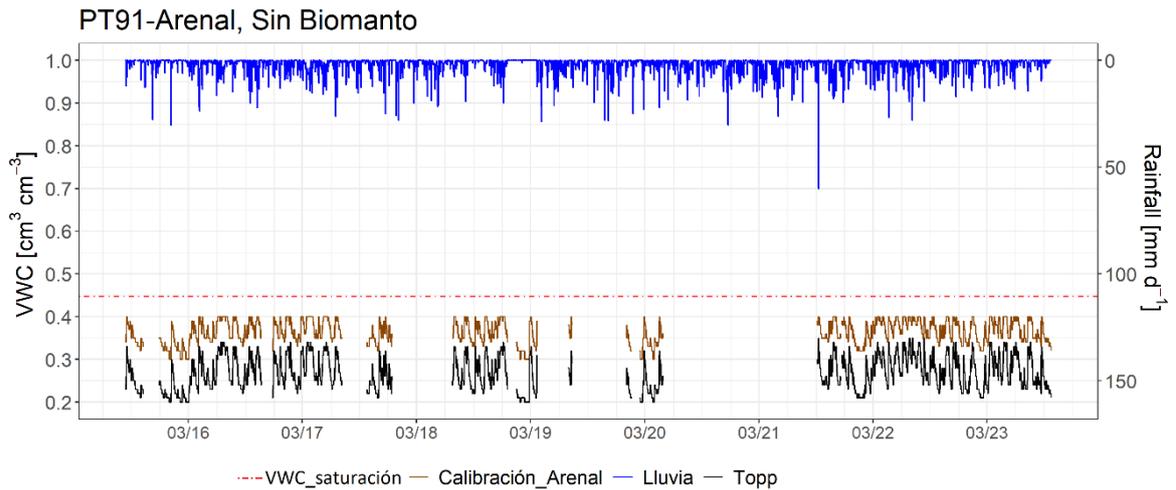


Figura 31: Serie temporal de contenido volumétrico de agua para el punto de muestreo PT91-SB, utilizando la ecuación “PT91-Arenal”

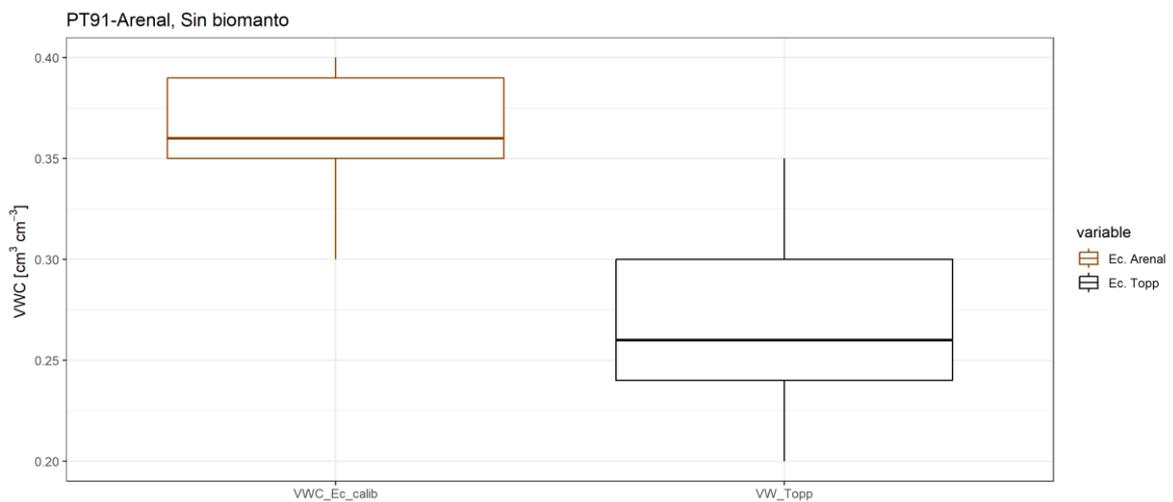


Figura 32: Diagrama de cajas de contenido volumétrico de agua en el suelo PT91-CB, empleando la ecuación de calibración Arenal

4 DISCUSIÓN

Los valores recopilados sobre las propiedades físicas muestran una visión integral del estado y potencial del suelo del Arenal 1, afectando directamente a las tendencias de las curvas de calibración obtenidas previamente. Analizarlas es una tarea importante, puesto que de esta forma se verifica si la aplicación de la ecuación de calibración es la adecuada para estimar valores de contenido volumétrico de agua y su relación con datos históricos de precipitación.

4.1 Propiedades físicas del suelo

Los parámetros físicos del suelo de páramo son bastante particulares y tienen importante similitud con turberas (Morocho & Chuncho, 2019). Pues tienen gran capacidad para almacenar agua, encontrándose valores de hasta el 90% de contenido gravimétrico (Llambí et al., 2012), lo cual supera en gran porcentaje al contenido de agua obtenido de las muestras inalteradas tomadas de ambos puntos de muestreo. Esto como resultado de años de afectación por actividad antrópica, alta densidad aparente, baja porosidad y muy bajo contenido de materia orgánica.

La escasa vegetación que presenta el lugar, ha repercutido en una disminución considerable de materia orgánica, puesto que no existe hojarasca que pueda descomponerse. Otro aspecto importante para considerar es que un suelo cuando está asociado con gran porcentaje de materia orgánica es generalmente de color oscuro negro (Llambí et al., 2012), mientras que los suelos muestreados del Arenal presentaban en su superficie una coloración gris y a mayor profundidad se observó tonos más claros grisáceos a rojizos. Es entonces que, esta disminución de materia orgánica reduce la porosidad y la capacidad de retención del agua en el suelo (Patiño et al., 2021).

La densidad aparente de ambos puntos de muestreo es bastante cercana entre sí, lo cual describe un nivel de compactación muy alto (Almendro-Candel et al., 2020) ya que este suelo estuvo expuesto años al sobrepastoreo. Además, sus valores son sumamente altos (1.68 g/cm^3 y 1.72 g/cm^3 respectivamente) en comparación con el dato de densidad aparente de 0.62 g/cm^3 característico de suelos de páramo que han sido sometidos a pastoreo de ganado según el estudio realizado para páramos andinos de Patiño et al., (2021), resultando valores que corresponden a suelos minerales (1.40 g/cm^3) con alto contenido de arena (57.1%) (Vaz et al., 2013).

Los suelos de páramos al no estar alterados presentan valores de porosidad de 54 a 61% (Carúa et al., 2008). Sin embargo, al existir compactación la densidad aparente aumenta y consigo el espacio poroso del suelo disminuye (Hernández et al., 2009) como lo sucedido en el Arenal resultando valores bajos de 45 y 42% para PT91-CB y PT91-SB respectivamente. Esto indica que la aplicación de biotextil de sacos de yute en 2014 no ha generado cambio significativo en cuanto a este parámetro.

Según el Grupo de Trabajo de Páramos del Ecuador (GTP) (Podwojewski et al., 2000) los suelos de los páramos del norte de Ecuador presentan granulometría arenosa. Del mismo modo, Páez-Bimos et al., (2023) afirma que la arena y limo son fracciones dominantes en suelos de páramo del Antisana en una proporción de 35% y 63% respectivamente, mientras

que para el Arenal, en promedio de los dos puntos de análisis, el porcentaje de arena es del 60% y para la fracción de finos es del 39%. Esto denota que, debido a la pérdida de cobertura vegetal, compactación y erosión del suelo, la textura se ha visto afectada, modificando los porcentajes de partículas gruesas y finas característicos de este tipo de suelo.

Otro parámetro afectado por las actividades antrópicas es el pH, siendo sus valores de 6.62 y 6.22 para cada punto de muestreo respectivamente, ya que según el estudio de Tonneijck et al., (2010) para suelos andinos del norte del Ecuador, en el horizonte A los rangos de pH son realmente ácidos (>5). Lo cual comparándolo con el pH de suelos minerales del estudio de Vaz et al., (2013) tiene valores cercanos. En alusión a lo anterior mencionado, se relaciona de forma indirecta con el contenido de materia orgánica, pues a mayor contenido de materia orgánica menor pH va a tener el suelo (Tonneijck et al., 2010) debido a la presencia de ácidos orgánicos y procesos de nitrificación por microorganismos (Osorio, 2012).

4.2 Curvas de calibración

4.2.1 Curva de calibración PT91-CB

La ecuación determinada corresponde a una polinómica de segundo grado, que por medio del $R^2=0.95$ se puede interpretar que el modelo sugiere un buen ajuste a los datos proporcionados. Además, los valores recopilados en campo son cercanos a la curva, por lo tanto, es acertada su aplicación en lugar de la ecuación de Topp. Por otro lado, de forma general se identifica que todas las curvas siguen una misma tendencia desde niveles bajos de contenido volumétrico de agua (< 0.20) a excepción de las curvas estimadas por Páez-Bimos et al., (2023) si bien estas pertenecen a suelos de la cuenca de Jatunhuayco al igual que el Arenal.

Se puede apreciar que la curva perteneciente a la ecuación de Topp se encuentra debajo de la curva de calibración PT91-CB, a pesar de que sigue la misma tendencia, infiere a valores subvalorados de VWC a partir de la permitividad registrada. El manual del reflectómetro de Campbell (2021) empleado para el estudio sugiere desarrollar una ecuación de calibración específica para suelos volcánicos, ya que con la ecuación estándar subestima el contenido volumétrico de agua; y pues, a pesar de que algunos parámetros determinados tienden a acercarse a valores de suelos minerales no son lo suficiente para ser descritos completamente por la ecuación de Topp et al., (1980).

Ahora bien, al analizar las ecuaciones de calibración determinadas por medio del método TDR bajo el estudio de Vaz et al., (2013) se identifica una tendencia cercana con la ecuación para suelos orgánicos y arenosos, esto viene relacionado al igual que la similitud en los valores de los parámetros físicos y químicos. Sin embargo, al comparar la curva PT91-CB con la curva para suelos minerales se observa una diferencia mucho más marcada, tal que subestima los valores de VWC notablemente más que la de Topp.

Finalmente, en comparación con las ecuaciones de calibración estimadas para suelos cercanos al Arenal, se determina que la similitud con la ecuación TU2A estimada por Páez-Bimos et al., (2023) tiene cierta semejanza, ya que esta está asociada al horizonte A2 donde el contenido volumétrico de agua disminuye conforme aumenta la profundidad. Mientras que, la ecuación para el horizonte A sobreestima los valores de VWC, ya que este tipo de suelo presenta densa vegetación característica de páramo como son los pajonales (Páez-Bimos et al., 2023). En contraste con la ecuación de calibración de la estación M5028 estimada por Proaño (2024), se percibe una pendiente mucho más pronunciada, lo cual puede deberse a la capacidad que tiene el suelo de saturarse con mayor facilidad que el Arenal gracias a sus características físicas que posee.

4.2.2 Curva de calibración PT91-SB

La ecuación determinada para el punto PT91-SB (fuera del área de restauración del Arenal) responde a una polinómica de segundo grado, con un R² de 0.86 lo cual indica una aproximación bastante buena. Además, se observa que las otras curvas de calibración siguen la misma tendencia y se encuentran dentro del buffer de 95% de la ecuación PT91-SB; a excepción de la curva TUA estimada por Páez-Bimos et al., (2023) que se encuentra sobre la ecuación calibrada. Existe una gran posibilidad de que esto sea consecuencia de que la curva TUA fue diseñada para el horizonte A en el que se tenía densa vegetación y sus propiedades físicas responden a una mayor retención de agua (Páez-Bimos et al., 2023).

Por el contrario, tiene una buena similitud con la ecuación TU2A, la cual fue calibrada para un horizonte inferior; así se evidencia la influencia de las raíces ausentes en el suelo en comparación con la anterior. Sin embargo, a valores de permitividad menores de 10 ya existe una subestimación ligera de VWC para el punto PT91-SB. Las siguientes dos ecuaciones que tienen una semejanza bastante acertada son las de Topp et al., (1980) y para suelos orgánicos y arenosos de Vaz et al., (2013). Para permitividades mayores a 15, los valores de VWC calculados por estas ecuaciones no son muy lejanos a los estimados por la ecuación PT91-SB, de hecho, un punto cae en la ecuación de Topp et al., (1980).

Pero, para menores a 15 ya se observa una subestimación por parte de estas dos ecuaciones.

La ecuación desarrollada por Proaño (2024) tiene una pendiente mucho más pronunciada, lo cual nos demuestra que ese suelo tiene mayor capacidad para almacenar agua que el del Arenal. Finalmente, la ecuación de Vaz et al., (2013) sigue una pendiente similar a la ecuación PT91-SB pero subestimando los valores de VWC, esto debido a las características minerales de este suelo, donde existe mayor compactación y menor porosidad.

4.2.3 Curva de calibración PT91-Arenal

La ecuación polinómica de segundo grado "PT91-Arenal" corresponde al conjunto de datos construido a partir de los registros de VWC y permitividad recopilados de los dos puntos de análisis. En la que se observa un ajuste considerable, a excepción de 2 puntos que se encuentran fuera de la zona buffer de la curva, además el coeficiente de determinación señala una calibración del modelo del 80%.

Se identifica que en el Arenal 1 el VWC no supera el 0.42 cm³/cm³, ni permitividades mayores a 30 en función de lo que se midió en laboratorio. A su vez, a permitividades menores a 13 se observa una pendiente mucho más pronunciada en la curva, esto puede deberse a que en laboratorio cuando se retiró el agua que estaba saturando a las muestras para que escurra, el suelo tendió a desmoronarse por la parte inferior del muestreador de PVC, por lo tanto, se las asentó sobre las tinas para que el agua drene por un agujero, sin embargo, al percibir que la permitividad no disminuía progresivamente se optó por retirar las muestras de las tinas y embalar la parte inferior de una tela permeable para que tenga más oportunidad de escurrir.

Por tal razón, se puede considerar que la tina ayudaba a retener el agua en los suelos muestreados, aparentando de valores altos a medios de permitividad en la curva una pendiente descendente no muy pronunciada. Mientras que, a permitividades menores a 13, una vez las muestras asentadas en las telas permeables se identifica un drenaje de agua más rápido, lo que aluce que este tipo de suelo no presenta una buena retención de agua.

Por otro lado, comparándola con las curvas anteriormente descritas, se identifica que tiene un ajuste muy similar con la curva TU2A (Páez-Bimos et al., 2023), a diferencia de la curva TUA que sobreestima el VWC por las características que presentaba el suelo para el que se calibró y de la curva para suelos minerales de Vaz et al., (2013) que subestima el VWC,

pues, el Arenal a pesar de haber sufrido una alteración de sus propiedades físicas por el sobrepastoreo estas no representan por completo valores típicos de suelos minerales.

La ecuación para suelos orgánicos y arenosos de Vaz et al., (2013) y la de Topp et al (1980) son bastantes cercanas a los valores de VWC de la ecuación PT91 -Arenal. Sin embargo, subestiman el VWC y no sería recomendable utilizarlas para tener un monitoreo constante para el suelo del Arenal. Por último, la ecuación para el suelo de la estación M5028 atraviesa la curva PT91 -Arenal, tal que subestima los valores de VWC cercanos al punto de marchitez y sobreestima los valores cercanos a la saturación.

4.3 Series temporales

El comportamiento del agua en el suelo se lo comparó en base a la serie temporal (desde 12/08/2015 hasta 23/09/2023) de VWC estimado por el sensor CS616 instalado en ambos puntos de análisis. Además, mediante los datos diarios de precipitación se identifica cómo afecta su presencia a la cantidad de humedad en el suelo.

4.3.1 PT91 – Con Biomanto

En la Figura 25 se presentan las series temporales de VWC determinados con la ecuación de Topp et al., (1980) y la ecuación de calibración PT91 -CB. Se observa en la primera que con la misma rapidez en que el suelo incrementa su contenido de agua luego se drena hasta valores de 0.25 cm³/cm³ aproximadamente y sus picos coinciden cuando existe mayor cantidad de lluvia, pero se encuentran lejanos a la línea roja de saturación.

Mientras que la segunda permanece en un rango entre 0.40 cm³/cm³ hasta el valor de saturación el cual es de 0.4605 cm³/cm³, esto significa que la ecuación responde bien cuando se tienen valores altos de permitividad tal que no sobrepasan con el límite de VWC. Esto quiere decir que, en campo debido a la presencia constante de lluvias el suelo no tiende a drenarse fácilmente y por lo tanto su VWC no disminuye a menos de 0.40 cm³/cm³ aproximadamente, a pesar de que su densidad aparente es elevada y su porosidad es baja (45%), ambas propiedades afectadas debido al pisoteo del ganado que existió y la falta de materia orgánica (Patiño et al., 2021).

En la Figura 27 de igual manera se muestran las dos series temporales, pero esta vez utilizando la ecuación de calibración "Arenal". De esta se observa una tendencia muy similar a la anterior, pero los picos de VWC apenas alcanzan valores cercanos a 0.40 cm³/cm³, tal como se muestra en la Tabla 12. En esta, es más claro identificar disminución

de VWC en ausencia de lluvias, pero los valores no disminuyen drásticamente como se observa en la serie temporal estándar.

Por otro lado, en los diagramas de cajas se aprecia como los datos se encuentran cercanos entre sí, de modo que no existe lejanía entre máximos y mínimos. Además, aquí es claro identificar que los valores de VWC son subestimados por la ecuación que utiliza el sensor, despreciando en promedio un 0.10 cm³/cm³ aproximadamente para la ecuación del Arenal y 0.14 cm³/cm³ para la ecuación PT91-CB.

Tabla 12: Resumen estadístico de los datos de VWC estimados con las ecuaciones de calibración y estándar para el punto PT91-CB

Parámetro	Ec. Calibración PT91-CB	Ec. Calibración Arenal	Ec. Topp
Mínimo	-0.3961	0.0976	0.2500
Primer cuartil	0.4352	0.3703	0.2700
Mediana	0.4453	0.3838	0.2900
Promedio	0.4425	0.3847	0.3007
Tercer cuartil	0.4512	0.4004	0.3300
Máximo	0.4556	0.4018	0.4900

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 PT91 – Sin Biomanto

Comparando las series presentadas en las Figuras 29 y 31 para el área del Arenal sin biomanto, se observa que las series temporales estimadas con las ecuaciones de calibración “PT91-SB” y “Arenal” tienen un comportamiento bastante similar a la serie temporal estándar, con picos mucho más pronunciados y una disminución mucho más abrupta. Sin embargo, ninguna de las dos ha llegado al valor máximo de saturación con agua del suelo, esto posiblemente se debe a que el sensor a pesar de que se encontraba a 10 cm de la superficie se observó otra tonalidad (rojiza) en el suelo, lo cual alude a otro horizonte, ya que debido al sobrepastoreo el horizonte superficial se ha desgastado considerablemente y no tiene la capacidad de llegar hasta la saturación.

Además, las propiedades físicas determinadas señalan una compactación producto del pisoteo intensivo y el suelo al estar expuesto se ve vulnerado sobre su capacidad de infiltración (Patiño et al., 2021). Lo cual desemboca en un incremento de la escorrentía superficial que puede aumentar hasta en un 300% en páramos donde el uso del suelo se ha destinado a ganadería (Poulenard et al., 2001).

A diferencia del punto de análisis anterior, en este se identifica que la ecuación Arenal se acerca más al valor de la saturación, lo cual refleja una mayor proximidad a la cantidad real de humedad en el suelo. Al igual que el punto PT91 -CB, mediante los diagramas de cajas y bigotes se observa que el conjunto de datos estándar de VWC se encuentra por debajo de las series temporales determinadas con las ecuaciones de calibración, esto denota que a pesar de que las propiedades físicas de este suelo han sido vulneradas no reflejan el mismo comportamiento de suelos minerales para los cuales es utilizada la ecuación de Topp et al., (1980).

Tabla 13: Resumen estadístico de los datos de VWC estimados con las ecuaciones de calibración y estándar para el punto PT91 -SB

Parámetro	Ec. Calibración PT91-SB	Ec. Calibración Arenal	Ec. Topp
Mínimo	0.2800	0.3000	0.2000
Primer cuartil	0.3100	0.3500	0.2400
Mediana	0.3200	0.3600	0.2600
Promedio	0.3284	0.3636	0.2674
Tercer cuartil	0.3500	0.3900	0.3000
Máximo	0.3900	0.4000	0.3500

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, comparando la dinámica de las cuatro series temporales con la serie temporal de VWC (TU-UP) de Páez-Bimos et al., (2023), se constata la diferencia en cuanto a la capacidad de retención de agua entre un suelo natural sin intervenciones versus un suelo perturbado. Para el suelo analizado por Páez-Bimos et al., (2023) es perceptible identificar cómo la humedad del suelo aumenta con el incremento de las precipitaciones y esta es retenida a lo largo de los días, sin disminuir a menos de 50 cm³/cm³ en el horizonte 3BC; mientras que para el suelo del Arenal en los horizontes superficiales analizados la saturación no alcanza ni el valor mínimo de los suelos no perturbados de la cuenca del Jatunhuayco.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizó ensayos de caracterización del suelo de ambos puntos de muestreo, en los que se comprobó una alteración considerable a las propiedades físicas típicas de suelos de páramo, determinándose densidad aparente elevada, baja porosidad, incremento en el porcentaje de partículas de arena y escasa materia orgánica en

ambos puntos de análisis. Lo cual ha impactado directamente en la capacidad de retención e infiltración de agua en el suelo.

- La escasez de materia orgánica en el Arenal es producto de la poca vegetación que se divisa. Esto como consecuencia de años de sobrepastoreo, generando compactación, pérdida de microporosidad y elevando la densidad aparente del suelo. Lo que ya no ha permitido el desarrollo de plantas características como son el pajonal y almohadilla, las cuales con sus raíces reducen la erosión y mejoran la estructura del recurso.
- Se determinó el contenido volumétrico de agua en función de la permitividad dieléctrica medida por el sensor CS650, en los que se registraron valores de VWC inferiores que en suelos andinos volcánicos aledaños a los puntos de muestreo como los de Páez-Bimos et al., (2023). De lo cual se desarrollaron las curvas de calibración tanto para el suelo con restauración como para el suelo sin restauración, las mismas que muestran tendencias intermedias entre curvas para suelos de páramo sin perturbaciones y para suelos arenosos a minerales.
- En ambos puntos de análisis (PT91-CB y PT91-SB) la ecuación de Topp et al., (1980) subestima los valores de VWC, demostrando que el suelo del Arenal es mineral pero no comparte por completo las características de un suelo que describe dicha ecuación, por lo tanto, necesita una calibración previa para el monitoreo constante del recurso hídrico.
- A partir de las series temporales diarias de VWC en ambos puntos, se identifica como el suelo gana humedad con la presencia de lluvias, pero tiende a drenarse rápidamente evidenciando picos consecutivos. A diferencia de series temporales de suelos de páramo que no han sido afectados, donde los picos no son frecuentes, de hecho, la humedad es más alta y se mantiene a lo largo de los días.

5.2 Recomendaciones

- Para suelos de texturas arenosas se recomienda colocar una tela permeable que cubra la parte inferior de la muestra grande, con el fin de que retenga al suelo muestreado y el agua drene sin obstáculos.
- Es importante tomar muestras inalteradas en dos temporadas del año, para realizar ensayos de contenido volumétrico de humedad como validación de campo en las curvas de calibración desarrolladas.

- Se sugiere utilizar una regla para medir la profundidad a la que se toman las submuestras, con el propósito de evitar compactar el suelo y alterar los resultados de las propiedades físicas destinadas a analizarse.
- Con base en las curvas de calibración obtenidas, se propone hacer uso de las ecuaciones correspondientes para el suelo con biomanto (PT91-CB) como para el suelo sin biomanto (PT91-SB), más no la ecuación “PT91-Arenal” por una ligera subestimación.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre N., Torres J. (2014a). *Restauración ecológica de los páramos de Jatunhuaycu: degradación, sistemas de referencia y estrategias de restauración*. Fondo para la Protección del Agua -FONAG. Quito, Ecuador
- Aguirre N., Torres J., Velasco P. (2014b). *Guía para la Restauración Ecológica en los Páramos del Antisana*. Fondo para la Protección del Agua-FONAG. Quito-Ecuador.
- Almendo-Candel, M. B., Poquet Perles, M. J., Gómez Lucas, I., Navarro-Pedreño, J., & Mataix-Solera, J. (2020). Effect of the application of two plant residues on the density and porosity of soils subjected to compaction. *Spanish Journal of Soil Science*, 10, 4073. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N3.06>
- Alvarez, C. (2020). ¿Cómo medir la cantidad de agua en los suelos? *NOTAS AGRÍCOLAS PAMPEANAS*, 1. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/12024/INTA_CR_LaPampa-SanLuis_AERGeneralPico_Alvarez_C._C%c3%b3mo%20medir%20la%20cantidad%20de%20agua%20en%20los%20suelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- American Society for Testing and Materials. (2019). *D2216-19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. 04.08, 7. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- American Society for Testing and Materials. (2020). *D2487: Práctica Estándar Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS)*. 04.08, 10. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- American Society for Testing and Materials. (2021). *D7263-21: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*. 7. <https://doi.org/10.1520/D7263-21>
- American Society for Testing and Materials. (2023). *D0854 – 23: Métodos de prueba estándar para Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de agua*. 9. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>

- Baldock, J. A. and Nelson, P. N. (1999). *Soil Organic Matter*. In 'Handbook of Soil Science. (Ed M. E. Sumner.) p. B25-B84. (CRC Press: Boca Raton, USA.)
- Behari, J. (2005). *Microwave dielectric behavior of wet soils*. Springer ; Anamaya.
- Benavides, D. E. A. (2012). *Influencia de los Procesos de Meteorización en la Estructura del Suelo y la Estabilidad de Taludes*.
- Brauman, K. A. (2015). Hydrologic ecosystem services: Linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *WIREs Water*, 2(4), 345-358. <https://doi.org/10.1002/wat2.1081>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Campbell, Scientific. (2023). CR300 Series Compact Datalogger. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr300.pdf>
- Campbell, Scientific. (2021). CS650 and CS655 Water Content Reflectometers. <https://www.campbellsci.es/cs650>
- COTECNO. (2024). *Sensor Campbell Sci. Sondas CS650 | Equipamiento científico | Prospecciones, auscultación, geofísica, Ingeniería*. COTECNO | Equipamiento Científico | Prospecciones, Auscultación, Geofísica, Ingeniería. <https://www.cotecno.cl/sensor-campbell-sci-sondas-cs650/>
- Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2020). *ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO*:
- Dixon, J. C. (2015). Soil Morphology in the Critical Zone: The Role of Climate, Geology, and Vegetation in Soil Formation in the Critical Zone. En *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 19, pp. 147-172). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00005-7>
- Eyherabide, M., Rozas, H. S., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). *COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR CARBONO ORGÁNICO EN SUELO*.
- Fondo para la Protección del Agua. (2020). *Plan Estratégico FONAG 2021-2025*. <https://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2022/01/Plan-Estrategico-Fonag-2021-2025-WEB.pdf>
- Garzón Roca, J.; Garrido De La Torre, ME.; Hidalgo Signes, C. (2017). *Clasificación de un suelo según SUCS*. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/84314>
- Gerenfes, D., Giorgis, A. G., & Negasa, G. (2022). Comparison of organic matter determination methods in soil by loss on ignition and potassium dichromate

- method. *International Journal of Horticulture and Food Science*, 4(1), 49-53.
<https://doi.org/10.33545/26631067.2022.v4.i1a.85>
- He, H., Aogu, K., Li, M., Xu, J., Sheng, W., Jones, S. B., González-Teruel, J. D., Robinson, D. A., Horton, R., Bristow, K., Dyck, M., Filipović, V., Noborio, K., Wu, Q., Jin, H., Feng, H., Si, B., & Lv, J. (2021). A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media. En *Advances in Agronomy* (Vol. 168, pp. 83-155). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.003>
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20-28.
<https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Dover.
- Jiménez, A. S., & Khalajabadi, S. S. (2005). *LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA*.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1972). *Mecánica de Suelos* (2nd ed.).
https://www.academia.edu/43300523/MECANICA_DE_SUELOS_TOMO_I_JUAREZ_BADILLO
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., Bievre, B. D., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*.
- Majcher, J., Kafarski, M., Wilczek, A., Woszczyk, A., Szyplowska, A., Lewandowski, A., Szerement, J., & Skierucha, W. (2020). Application of a Monopole Antenna Probe with an Optimized Flange Diameter for TDR Soil Moisture Measurement. *Sensors*, 20(8), 2374. <https://doi.org/10.3390/s20082374>
- Martínez, J., Ceballos, A. (2001). Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. *Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5594329>
- Mauricio, J. (2005). *Introducción al Análisis de Series Temporales* (1st ed.).
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42396751/518-2013-11-11-JAM-IASST-Libro-libre.pdf?1454960455=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAnálisis_de_Series_Temporales.pdf&Expires=1718756129&Signature=f8FkPC9rWCqmJmNdzH4jnN7PqgmbhmdX9zWFLHSaUG0JFhnl63vv3mO48MS~hqDNKGvuOx8ziYiNba2GFhYa~86aBw-12zqAWg6DW1qrk2zTS4o~frPXhKrtJBD0fkr2pglBchJ~Q~DaMmB0olmhDRAYfYxnRjWvyPel8LNIvywpMifXnHvt2qjR8B-D45hy52rwVdgVwSPI6MtJz-V50MMJx-OYHKUlpNa86FjN4lyZhuVvSEBMOFZaurR0gRfa2RNtVwCuzj3-

- NVzq3Tip8GlxS7N~FKXTNNoPS894trfpr7EbYiXbMpfNYL76uXtfzrS7f5-xygwVAIanh8cBw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Méndez, J. (2022). *Efectos del cambio de uso del suelo en las propiedades físicas y químicas en la microcuenca del Soroche*. [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Cuenca].
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37807>
- Miyamoto, T., Annaka, T., & Chikushi, J. (2003). Soil Aggregate Structure Effects on Dielectric Permittivity of an Andisol Measured by Time Domain Reflectometry. *VADOSE ZONE J.*, 2.
- Morocho, C. C., & Chuncho, G. (2019). *Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión*. 9.
- Ordóñez, S. (2024). *CALIBRACIÓN SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO "M5028"*. [Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Escuela Politécnica Nacional].
- Osorio, N. W. (2012). *pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES*. 1(4).
- Páez-Bimos, S., Molina, A., Calispa, M., Delmelle, P., Lahuate, B., Villacís, M., Muñoz, T., & Vanacker, V. (2023). 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., Villacís, M., Morales, O., Calispa, M., Molina, A., Salgado, S., Bievre, B. D., Pierre, D., Muñoz, T., & Vanacker, V. (2022). *Vegetation effects on soil pore structure and hydraulic properties in volcanic ash soils of the high Andes*. 20. <https://doi.org/10.1002/hyp.14678>
- 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>
- Porta, J., López, M., & Poch, R. (2019). *Edafología, uso y protección de suelos* (4.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
<https://books.google.es/books?id=SZ3BDwAAQBAJ&lpg=PA5&ots=3LGOwton2m&dq=factores%20para%20la%20formacion%20suelo&lr&hl=es&pg=PA3#v=onepage&q=factores%20para%20la%20formacion%20suelo&f=false>
- 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)
- Quinteros, L. (2017). *Respuesta hídrica de suelos de páramo bajo diferentes niveles de degradación, estudio de caso a escala de parcela*. [Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18887>
- Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (2015). Estimation of Soil Organic Matter by Weight Loss-On-Ignition. En F. R. Magdoff, M. A. Tabatabai, & E. A. Hanlon (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 21-31). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3>
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- Shukla, M. (2014). *Soil Physics An Introduction*. CRC Prezz.
- Souto, F. J., Dafonte, J. D., & Viña, M. E. (2017). DISEÑO Y CALIBRACIÓN AIRE-AGUA DE UN CONECTOR DE GUÍAS DE TDR PARA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA EN SUELOS PEDREGOSOS. (Proyecto fin de carrera para obtener el título de Ingeniero Electrónico). Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/90f01921-4025-4d0a-9fee-f6a5121cc8e0>
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392-405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- 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>
- 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>
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Hendricks Franssen, H. J., Brüggemann, N., Bogaen, H. R., Kollet, S., Javaux, M., Van Der Kruk, J., & Vanderborght, J. (2015). Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives. *Water Resources Research*, 51(4), 2616-2633. <https://doi.org/10.1002/2014WR016852>

Wang, J. R., & Schmugge, T. J. (1980). An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-18(4), 288-295.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.350304>

Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow*. The Groundwater Project.

7 ANEXOS

ANEXO 1: Tabla de densidad del agua y coeficiente de temperatura “k” a diferentes temperaturas

Temperature (°C)	Density (g/mL) ^B	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^B	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^B	Temperature Coefficient (K)	Density (g/mL) ^B	Temperature Coefficient (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	1	0.99878	1.00057	0.99860	1.00039
.1	0.99909	1.00088	.1	0.99893	1.00072	.	0.99876	1.00055	0.99858	1.00037
.2	0.99907	1.00087	.2	0.99891	1.00071	.2	0.99874	1.00054	0.99856	1.00035
.3	0.99906	1.00085	.3	0.99889	1.00069	.3	0.99872	1.00052	0.99854	1.00034
.4	0.99904	1.00084	.4	0.99888	1.00067	.4	0.99871	1.00050	0.99852	1.00032
.5	0.99902	1.00082	.5	0.99886	1.00066	.5	0.99869	1.00048	0.99850	1.00030
.6	0.99901	1.00080	.6	0.99885	1.00064	.6	0.99867	1.00047	0.99848	1.00028
.7	0.99899	1.00079	.7	0.99883	1.00062	.7	0.99865	1.00045	0.99847	1.00026
.8	0.99898	1.00077	.8	0.99881	1.00061	.8	0.99863	1.00043	0.99845	1.00024
.9	0.99896	1.00076	.9	0.99879	1.00059	.9	0.99862	1.00041	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	2	0.99799	0.99979	0.99777	0.99957
.1	0.99839	1.00018	.1	0.99819	0.99998	.	0.99797	0.99977	0.99775	0.99954
.2	0.99837	1.00016	.2	0.99816	0.99996	.2	0.99795	0.99974	0.99773	0.99952
.3	0.99835	1.00014	.3	0.99814	0.99994	.3	0.99793	0.99972	0.99771	0.99950
.4	0.99833	1.00012	.4	0.99812	0.99992	.4	0.99791	0.99970	0.99768	0.99947
.5	0.99831	1.00010	.5	0.99810	0.99990	.5	0.99789	0.99968	0.99766	0.99945
.6	0.99829	1.00008	.6	0.99808	0.99987	.6	0.99786	0.99966	0.99764	0.99943
.7	0.99827	1.00006	.7	0.99806	0.99985	.7	0.99784	0.99963	0.99761	0.99940
.8	0.99825	1.00004	.8	0.99804	0.99983	.8	0.99782	0.99961	0.99759	0.99938
.9	0.99823	1.00002	.9	0.99802	0.99981	.9	0.99780	0.99959	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	2	0.99705	0.99884	0.99679	0.99858
.1	0.99752	0.99931	.1	0.99727	0.99907	.	0.99702	0.99881	0.99676	0.99855
.2	0.99749	0.99929	.2	0.99725	0.99904	.2	0.99700	0.99879	0.99673	0.99852
.3	0.99747	0.99926	.3	0.99723	0.99902	.3	0.99697	0.99876	0.99671	0.99850
.4	0.99745	0.99924	.4	0.99720	0.99899	.4	0.99694	0.99874	0.99668	0.99847
.5	0.99742	0.99921	.5	0.99717	0.99897	.5	0.99692	0.99871	0.99665	0.99844
.6	0.99740	0.99919	.6	0.99715	0.99894	.6	0.99689	0.99868	0.99663	0.99842
.7	0.99737	0.99917	.7	0.99712	0.99892	.7	0.99687	0.99866	0.99660	0.99839
.8	0.99735	0.99914	.8	0.99710	0.99889	.8	0.99684	0.99863	0.99657	0.99836
.9	0.99732	0.99912	.9	0.99707	0.99887	.9	0.99681	0.99860	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	2	0.99595	0.99774	0.99565	0.99744
.1	0.99649	0.99828	.1	0.99621	0.99800	.	0.99592	0.99771	0.99562	0.99741
.2	0.99646	0.99825	.2	0.99618	0.99797	.2	0.99589	0.99768	0.99559	0.99738
.3	0.99643	0.99822	.3	0.99615	0.99794	.3	0.99586	0.99765	0.99556	0.99735
.4	0.99641	0.99820	.4	0.99612	0.99791	.4	0.99583	0.99762	0.99553	0.99732
.5	0.99638	0.99817	.5	0.99609	0.99788	.5	0.99580	0.99759	0.99550	0.99729
.6	0.99635	0.99814	.6	0.99607	0.99785	.6	0.99577	0.99756	0.99547	0.99726
.7	0.99632	0.99811	.7	0.99604	0.99783	.7	0.99574	0.99753	0.99544	0.99723
.8	0.99629	0.99808	.8	0.99601	0.99780	.8	0.99571	0.99750	0.99541	0.99720
.9	0.99627	0.99806	.9	0.99598	0.99777	.9	0.99568	0.99747	0.99538	0.99716

Fuente: ASTM-854 (2023)

ANEXO 2: Código No. 1 de RStudio para visualizar la variación de permitividad hasta la saturación con agua de las muestras grandes inalteradas.

rm(list = ls())

```

library(xts)

library(zoo)

library(ggplot2)

library(reshape)

library(ggpubr)

library(scales)

#####
##

#1. data- aggregation #####

#permittivity

calib_5min <- 0

for (i in 1:length(list.files(pattern='^ANT'))){

  calib<-as.character(list.files(pattern='^ANT')[[i]])

  temp_calib<-read.csv(calib,skip = 1,header=T, sep=",",stringsAsFactors=FALSE)

  temp_calib2<-
as.data.frame(cbind(temp_calib$P_Avg,temp_calib$P_2_Avg,temp_calib$P_3_Avg,temp
_calib$P_4_Avg))

  temp_calib2<- temp_calib2[c(-1,-2),]

  temp_calib3 <- 0

  for (j in 1:ncol(temp_calib2)){

    in_calib_fix <- as.numeric(as.character(temp_calib2[,j]))

    temp_calib3 <- cbind(temp_calib3, in_calib_fix)

  }

  temp_calib3 <-temp_calib3[,-1]

  temp_calib3 <- as.data.frame(temp_calib3)

```

```

calib_5min_temp <- cbind(temp_calib$TIMESTAMP[c(-1,-2)],temp_calib3)

colnames(calib_5min_temp) <- c("TS","M5028","M5029","PT91_AF","PT91-AD")
#c("P1","P2","P3","P4")

calib_5min <- rbind(calib_5min,calib_5min_temp)
}

calib_5min <-calib_5min[-1,]

colnames(calib_5min) <- c("TS","M5028","M5029","PT91-AD","PT91-AD")
#c("P1","P2","P3","P4")

#####
##

#2. delete duplicates

#####
##

aa<-duplicated(calib_5min)

calib_5min<-calib_5min[!aa,]

zoo_calib_5min <- zoo(calib_5min[,-1],as.POSIXct(calib_5min$TS,format ="%Y-%m-%d
%H:%M:%S", tz="UTC"))

p_avg <- data.frame(as.POSIXct(calib_5min$TS,format ="%Y-%m-%d %H:%M:%S",
tz="UTC"),calib_5min$`M5028`,calib_5min$`M5029`,calib_5min$`PT91 -
AF`,calib_5min$`PT91-AD`)

colnames(p_avg)<-c("TS","M5028","M5029","PT91-AD","PT91-AD")
#c("TS","PA1","PA2","PA3","PA4")

melt_p_avg <- melt(p_avg,id.vars="TS")

melt_p_avg$value <- as.numeric(melt_p_avg$value)

save(melt_p_avg, file="melt_p_avg1.RData")

```

```
#####  
##
```

#3. find values based on dates

```
#####  
##
```

```
fecha1<- as.POSIXct(c("13-11-2023 14:20:00"), format="%d-%m-%Y %H:%M:%S")
```

```
datafecha1<- p_avg[p_avg$TS==fecha1,]
```

```
print(datafecha1)
```

```
fecha2<- as.POSIXct(c("15-11-2023 15:00:00"), format="%d-%m-%Y %H:%M:%S",  
tz="UTC")#27/01/2020
```

```
datafecha2<- p_avg[p_avg$TS==fecha2,]
```

```
print(datafecha2)
```

```
fecha3<- as.POSIXct(c("21-11-2023 15:00:00"), format="%d-%m-%Y %H:%M:%S",  
tz="UTC")
```

```
datafecha3<- p_avg[p_avg$TS==fecha3,]
```

```
print(datafecha3)
```

```
fecha4<- as.POSIXct(c("28-11-2023 14:30:00"), format="%d-%m-%Y %H:%M:%S")
```

```
datafecha4<- p_avg[p_avg$TS==fecha4,]
```

```
print(datafecha4)
```

```
fecha5<- as.POSIXct(c("12-12-2023 14:20:00"), format="%d-%m-%Y %H:%M:%S")
```

```
datafecha5<- p_avg[p_avg$TS==fecha5,]
```

```
print(datafecha5)
```

- revisar fechas buscadas y registradas sean igual UTC!!

```
#####  
##
```

#4. plot

```
#####
##

load("melt_p_avg1.RData")

plot_P = ggplot(melt_p_avg,aes(x=TS,y=value, color=variable))+

  geom_point()+

  labs(color = "Samples")+

  xlab("timestamp") + ylab("Permittivity [-]") +

  ylim(c(0,65))+

  scale_y_continuous(breaks= c(5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65))+

  scale_x_datetime(breaks = date_breaks("3 day"), minor_breaks=date_breaks("1
day"),date_labels = "%d/%m/%y") +

  geom_vline(xintercept = c(fecha1,fecha2,fecha3,fecha4,fecha5), color = "black",
size=0.5)+

  theme_bw()

png(file='calibtdr_p_test_2024_01_09.png',width = 1200, height = 600)

plot_P

#annotate_figure(plot_P,

#               top = text_grob("WCR Calibration", color = "black", face = "bold", size = 16),

#               bottom = text_grob("Source: \n DICA ", color = "blue",

#                                 hjust = 1, x = 1, face = "italic", size = 10))

dev.off()
```

ANEXO 3: Código No. 2 de RStudio para la generación de las curvas de calibración

```
#Limpiar entorno de trabajo

rm(list = ls())

gc()
```

```

#Establecer zona horaria
Sys.setenv(tz="UTC")

#Activación de librerías
library(xts)
library(zoo)
library(ggplot2)
library(reshape)
library(ggpubr)
library(scales)
library(polynom)
library(ggpmisc)

##### CALIBRACIÓN DE ECUACIONES
#####

#Reconocer el archivo
data_calib<-read.csv("data_calib_vwc_TIC_Arenal.csv",skip = 0,header=T,
sep=",",stringsAsFactors=FALSE)

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

##### Ecuaciones para comparar #####

data_p = seq(5,27,0.1)

#1.Ecuación de Topp
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")
```

```
#2.Ec. Mineral Soils
```

```
MS = (0.099*data_p^0.5) - (0.178)
```

```
MS2= data.frame(data_p,MS)
```

```
colnames(MS2) = c("P","MS")
```

```
#3.Ec. Organic and sandy soils
```

```
OSS = (0.119*(data_p)^(0.5)) - (0.167)
```

```
OSS2= data.frame(data_p, OSS)
```

```
colnames(OSS2)= c("P", "OSS")
```

```
#4.Ec. M5028
```

```
M5028 = (-0.18)+(0.046*data_p)-(7.1*(10^-4)*data_p^2)
```

```
M50282= data.frame(data_p, M5028)
```

```
colnames(M50282)= c("P", "M5028")
```

```
#5.Ec. TUA
```

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

```
TUA2= data.frame(data_p,TUA)
```

```
colnames(TUA2) = c("P","TUA")
```

```
#6.Ec. TU2
```

```
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")
```

```
data=cbind.data.frame(Topp2,MS2[,2],OSS2[,2],M50282[,2],TUA2[,2],TU2A2[,2])
```

```
colnames(data)=c("P","Topp","Mineral Soil","Organic and Sandy  
Soil","M5028","TUA2","TU2A")
```

```
##### Calibración PT91 #####

cal_tuA <- data_calib[data_calib$Vegetation=="TU" & data_calib$Horizon=="A",]

plot_tuA <- ggplot(data,aes(x=P))+

  stat_smooth(data=cal_tuA,aes(x=MEAN.P, y=MEAN.VWC, color="black"),method="lm",
na.rm=T,se=T,fill="gray",formula=my.formula, colour="black", level=0.95, linewidth=0.5)+

  geom_point(data=cal_tuA,aes(x=MEAN.P, y=MEAN.VWC, color="black"),size=3)+

  geom_point(data=cal_tuA,aes(x=F_MEAN.P, y=F_MEAN.VWC, color="red"),size=3)+
#agregar datos campo

#geom_point(size=c(3),shape=c(19))+

geom_line(aes(y=Topp), color="turquoise3", lty=2)+ #agregar curvas
geom_line(aes(y=MS), color="orangered2", lty=5)+
geom_line(aes(y=OSS), color="coral4",lty=4)+
geom_line(aes(y=M5028), color="blue2", lty=5)+
geom_line(aes(y=TUA), color= "deeppink3", lty=6)+
geom_line(aes(y=TU2A), color="green2", lty="aa")+
scale_color_manual(values = c("black","red"),

  labels = c("Calibración", "Campo"))+
xlim(5,27)+ ylim(0,0.7)+

ggtitle("PT91-Arenal")+

xlab("Permittivity [-]")+ ylab(expression(paste("VWC[" ,cm^3,cm^3, "]" ,sep*"")))+

theme_bw()+

theme(plot.title = element_text(size=18),

  legend.position=c("bottom"),

  legend.title = element_blank(),

  legend.text=element_text(size=14),

  axis.title.y=element_text(size=14),
```

```

axis.title.x=element_text(size=14),
axis.text.y=element_text(size=13),
axis.text.x=element_text(size=13))
#####
m<- lm(my.formula,data.frame("x"=cal_tuA$MEAN.P,"y"=cal_tuA$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_tuA <- plot_tuA+annotate(geom="text",x=12,y=0.6,label=label.text,
family="serif",hjust=0,parse=TRUE,size=7)
png(file='calibtdr_prueba.png',width = 4000, height = 2000, res=300)
plot_tuA
dev.off()

write.csv(par_tuA,file = "parameters_calib20210111.csv")

```

ANEXO 4: Código No. 3 de RStudio para el procesamiento de VWC y Precipitación a datos diarios

```

#####TRATAMIENTO DE
DATOS#####
#Limpiar área de trabajo
rm(list=ls())
gc()

```

```

Sys.setenv(tz="UTC")

#Activar librería
library(zoo) #time series

#1. Precipitación

#Leer
input_p <- read.csv("PRECIPITACIONES.csv", header = T) #load observed values VWC
input_p$TIEMPO = as.POSIXct(input_p$TIEMPO,format="%Y-%m-%d %H:%M:%S")
zoo_p<-zoo(input_p$RAIN,input_p$TIEMPO)

#Cambiar a días
ind_days <- strptime("1970-01-01", "%Y-%m-%d", tz="UTC") +
ceiling(as.numeric(index(zoo_p))/(24*60*60))*(24*60*60)
zoo1d_sum_p <- aggregate(zoo_p[,2],ind_days,function(x) round(sum(x,na.rm = T),2))
zoo1d_p <- zoo(coredata(zoo1d_sum_p),as.POSIXct(index(zoo1d_sum_p)))

#Generar un archivo
data_frame_PREC_DIAS <- data.frame(TIEMPO = index(zoo1d_p), RAIN =
coredata(zoo1d_p))

# Escribir el resultado en un archivo CSV
write.csv(data_frame_PREC_DIAS, file = "datos_diarios_prec.csv", row.names = FALSE)

#2. VWC Arenal 1 (minutos)

#Leer
input_2<-read.csv("VWC2_M.csv",header=T)
input_2$TIEMPO=as.POSIXct(input_2$TIEMPO,format="%d/%m/%Y %H:%M")
zoo_2<-zoo(input_2$VW_Avg,input_2$TIEMPO)

#Cambiar a horas
ind_1hr2 <- strptime("1970-01-01", "%Y-%m-%d", tz="UTC") +
ceiling(as.numeric(index(zoo_2))/(1*60*60))*(1*60*60) # para media hora, reemplazar 1 x
0.5
zoo1hr_mean2 <- aggregate(zoo_2[,2],ind_1hr2,function(x) round(mean(x),2))
zoo1hr_2<- zoo(zoo1hr_mean2,as.POSIXct(index(zoo1hr_mean2),format = "%Y-%m-%d
%H:%M", tz="UTC"))

#Generar un archivo

```

```

data_frame_dos <- data.frame(TIEMPO = index(zoo1hr_2), VW_Avg =
coredata(zoo1hr_2))
# Escribir el resultado en un archivo CSV
write.csv(data_frame_dos, file = "datos_1H_dos.csv", row.names = FALSE)

#3. VWC en horas
input_2 <- read.csv("datos_1H_dos.csv", header = T) #load observed values VWC
input_2$TIEMPO = as.POSIXct(input_2$TIEMPO,format="%d/%m/%Y %H:%M")
zoo_VWC2<-zoo(input_2$VW_Avg,input_2$TIEMPO)
#TRANSFORMAR A DÍAS
ind_days <- strptime("01/01/1970", "%d/%m/%Y", tz="UTC") +
ceiling(as.numeric(index(zoo_VWC2))/(24*60*60))*(24*60*60)
zoo1d_VWC_dos <- aggregate(zoo_VWC2[,2],ind_days,function(x) round(mean(x,na.rm
= T),2))
zoo1d_VWC2 <- zoo(coredata(zoo1d_VWC_dos),as.POSIXct(index(zoo1d_VWC_dos)))
#Generar un archivo
data_frame_VWC_DIAS_dos <- data.frame(TIEMPO = index(zoo1d_VWC2), VW_Avg =
coredata(zoo1d_VWC2))
# Escribir el resultado en un archivo CSV
write.csv(data_frame_VWC_DIAS_dos, file = "datos_diaros2.csv", row.names = FALSE)

```

ANEXO 5: Código No. 4 de RStudio para la determinación de la permitividad en función del VWC empleando la ecuación de Topp.

```

#####DETERMINACIÓN DE LA PERMITIVIDAD DE
TOPP#####
#Limpiar área de trabajo
rm(list=ls())
gc()
Sys.setenv(tz="UTC")
# Instalar y cargar el paquete necesario

```

```

if (!requireNamespace("dplyr", quietly = TRUE)) {
  install.packages("dplyr")
}

library(dplyr)

# Leer el archivo CSV

data <- read.csv("VWC2.csv")

# Definir la función y su derivada

f <- function(P, x) -5.3e-2 + 2.92e-2 * P - 5.5e-4 * P^2 + 4.3e-6 * P^3 - x
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 x

calculate_P <- function(x) {
  if (is.na(x)) {
    return(NA) # Devolver NA si x es NA
  } else {
    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, x) / f_prime(P)
        if (abs(P - P_prev) < tol) {
          return(P)
        }
      }
    }
  }
}

```

```

    }

    stop("El método de Newton-Raphson no convergió.")

  }

  return(newton_raphson(0)) # Se elige 0 como valor inicial
}

}

# Aplicar el método a cada valor de x

data_result <- data %>%

  mutate(P = sapply(x, calculate_P))

# Guardar los resultados en un nuevo archivo CSV

write.csv(data_result, "Perm_Arenal_2.csv", row.names = FALSE)

```

ANEXO 6: Código No. 5 de RStudio para la generación de series temporales de VWC y precipitación

```

##### VWC and Rain #####

#Limpiar área trabajo

rm(list=ls())

gc()

Sys.setenv(tz="UTC")

#Librerías a usar

library(ggplot2)

library(zoo) #time series

library(gridExtra) #plot help

library(ggpubr) #figures

library(scales) #date_breaks

```

```

library(reshape) #modify objects

library(grDevices)

## Set-up

#####

#####

start= "12/8/2015" #input date as format dd/mm/yyyy

end = "23/9/2023" #input date as format dd/mm/yyyy

start= as.POSIXct(start,format ="%d/%m/%Y", tz="UTC")

end = as.POSIXct(end,format ="%d/%m/%Y", tz="UTC")

tMax =length(seq(start,end,by=60*60*24))

#print(length(seq(start,end,by=60*60*24)))

input_data <- read.csv("VWC2_y_PREC ec_ambos.csv", header = T) #load observed
values VWC

input_data$TIEMPO = as.POSIXct(input_data$TIEMPO,format="%d/%m/%Y")

#Gráfico

Arenal_1= ggplot(input_data, aes(x = TIEMPO)) +

  geom_line(aes(y= VWC_Ec_calib, colour = "Calib"),linetype = "solid") +

  geom_line(aes(y= VW_Topp, colour = "Topp"),linetype = "solid") +

  geom_step(aes(y= (RAIN*-0.005)+1, colour = "Rain"),stat = "identity") +

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

  scale_color_manual(values = c("darkorange4","blue","gray1"),

    labels = c("Calibración","Lluvia","Topp")) +

```

```

xlab(NULL) + ggtitle("PT91-Arenal, Con Biomanto")+
scale_x_datetime(breaks = date_breaks("12 month"), minor_breaks=date_breaks("3
month"),date_labels = "%m/%y") +
theme_bw() +
geom_hline(yintercept = 0.4178, linetype="dotdash", color = "red", linewidth=0.5)+
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))

png(file='Serie_temp_CB_ec_ambos_final.png', height=1500, width=3500, res = 300)
Arenal_1
dev.off()

```

Anexo 7: Código No. 6 de RStudio para la generación de diagrama de cajas y parámetros estadísticos.

```

##### DIAGRAMA DE CAJAS
#####

input_data2 = input_data[,-c(2)]

melt_Afuera = melt(input_data2,id="TIEMPO")

BP_Afuera = ggplot(melt_Afuera, aes(x=variable, color=variable)) +
geom_boxplot(aes(y= value))+
scale_color_manual(values = c("darkorange4","gray1"),
                  labels = c("Calibración, Ec. Arenal","Topp")) +
xlab(NULL) + ggtitle("PT91-Arenal, Con biomanto")+

```

```

ylab(expression(paste("VWC [",cm^3," ",cm^-3,"]",sep = " ")))
theme_bw()

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

BP_Afuera

dev.off()

summary(input_data2)# estadística

```

ANEXO 8: Resultados de parámetros físicos y químicos determinados en laboratorio

Tabla I: Resultados contenido de humedad en el suelo de muestras inalteradas

Punto de muestreo	PT91-CB		PT91-SB	
Número de muestra	1	2	1	2
Masa cápsula (g)	103.66	103.04	103.35	104.00
Masa cápsula y suelo húmedo (g)	267.03	274.49	273.27	251.27
Masa cápsula y suelo seco (g)	242.97	249.61	249.25	229.97
Contenido humedad	17	17	16	17

Tabla II: Resultados Densidad Volumétrica del suelo

Parámetro	PT91-CB	PT91-SB
Densidad Húmeda (g/cm ³)	1.68	1.72
Densidad Seca (g/cm ³)	1.44	1.47

Tabla III: Resultados Gravedad Específica

Parámetro	PT91-CB	PT91-SB
Pasa tamiz No.4 (%)	97.2	98.7
Método de ensayo	B (Muestra seca)	B (Muestra seca)
Volumen del matraz a 20°C (ml)	500	500
Masa del matraz (g)	161.81	161.807

Masa del matraz + agua (g)	660.63	660.634
Masa del matraz + agua + suelo (g)	719.81	719.744
Temperatura (°C)	20	20
Masa del recipiente (g)	165.76	189.511
Masa suelo seco + recipiente (g)	261.7	287.58
Masa suelo seco (g)	95.95	98.069
Gravedad específica, GsT°C	2.609	2.517
Coeficiente de temperatura, K	1	1
Gravedad específica, Gs20°C	2.609	2.517

Tabla IV: Resultados Porosidad

Parámetro	PT91-CB	PT91-SB
Densidad húmeda total (g/cm ³)	1.68	1.72
Contenido de humedad, w (%)	17	17
Densidad seca (g/cm ³)	1.44	1.47
Gravedad específica, Gs 20°C	2.61	2.52
Relación de vacíos,	0.82	0.72
Porosidad, n (%)	45	42

Tabla V: Resultados Granulometría (Clasificación SUCS)

Tamiz	Abertura tamiz	Porcentaje pasante (%)	
	(mm)	PT91-CB	PT91-SB
3/8 in	9.500	100	100
No. 4	4.750	99	96.8
No. 10	2.000	93.5	92.1
No. 20	0.850	85.2	86.7
No.40	0.425	76.8	79.9
No.60	0.250	66.3	64.4
No.100	0.150	55	48.4
No.140	0.106	47.7	40.1
No.200	0.075	42.4	34.7

Bandeja <0.075	0	0
Clasificación SUCS	SM	SM

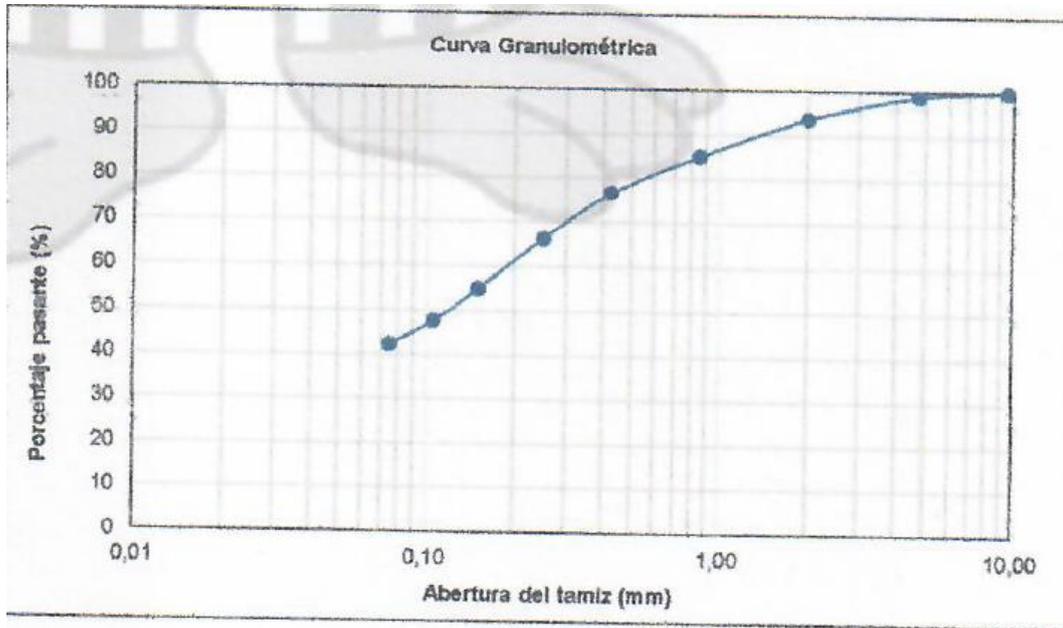


Figura I: Curva de granulometría para el punto de muestreo PT91-CB

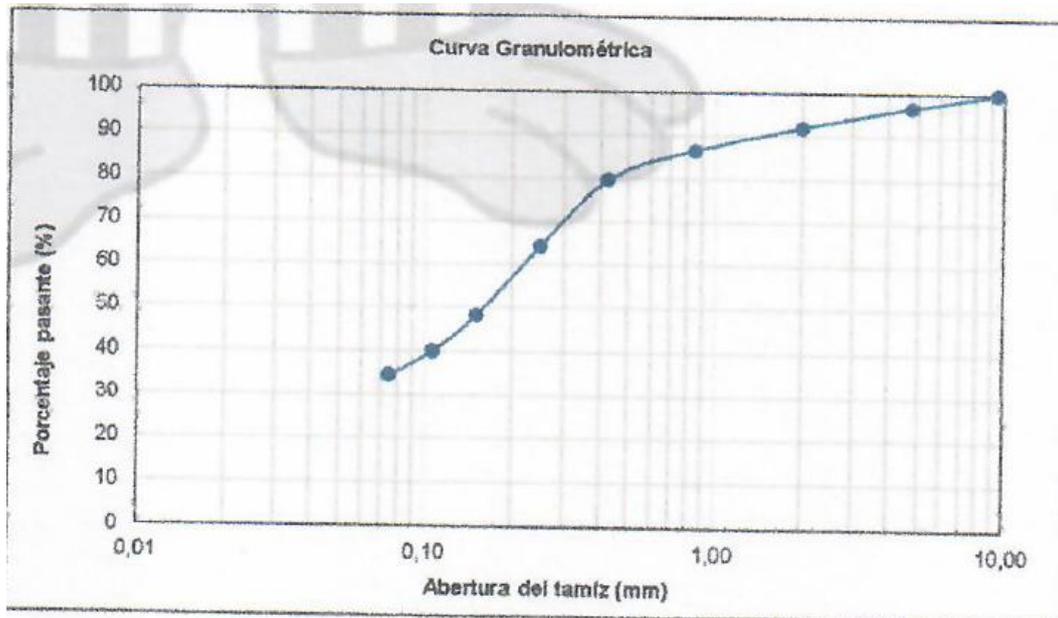


Figura II: Curva de granulometría para el punto de muestreo PT91-SB

Tabla VI: Resultados Contenido de Materia Orgánica

CODIGO ESTACIÓN	ID Crisol	CRISOL	Peso Inicial	Después de estufa	Después de Mufla	Después de estufa	Después de Mufla	MO	
		Peso (g)	(g)	Crisol + muestra (g)	Crisol + muestra (g)	Peso seco (g)	Peso final (g)	%	
PT91-SB	A5	36.4878	10.0000	44.4947	44.2919	8.0069	7.8041	2.53	2.48
	J1	41.3514	9.9999	49.5114	49.3137	8.1600	7.9623	2.42	
PT91-CB	DP2	43.9647	10.0021	51.8334	51.6117	7.8687	7.6470	2.82	2.82
	9B	31.7074	10.0001	39.5709	39.3493	7.8635	7.6419	2.82	

Tabla VII: Dimensiones muestreadores pequeños

Muestreador	Ø (mm)		Ø	h (mm)			h	Volumen	Peso
	Ø 1	Ø 2	(mm)	1	2	3	(mm)	(cm3)	(g)
M1	27.91	27.74	27.83	70.04	69.89	70.26	70.06	42.60	69.70
M2	27.79	27.70	27.75	68.99	69.05	69.57	69.20	41.84	68.15
M3	27.59	27.84	27.72	69.66	70.09	70.15	69.97	42.21	68.37
M4	27.66	24.78	26.22	70.26	70.22	70.09	70.19	37.90	67.73
M5	27.77	27.74	27.76	70.60	70.27	70.35	70.41	42.60	69.47
M6	27.63	27.91	27.77	70.06	70.19	70.27	70.17	42.50	68.27
M7	27.75	27.91	27.83	70.34	70.41	70.39	70.38	42.81	68.52
M8	27.74	27.81	27.78	69.99	70.29	70.17	70.15	42.50	68.60
M9	27.43	27.62	27.53	70.29	70.32	70.42	70.34	41.86	68.07

Fuente: Elaboración propia