

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO ELECTRÓNICO
PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA DE
SUELOS EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN

Presentado por:

- Bach. Vladymir Efrain Madera Olivera

Para Optar al Título Profesional de Ingeniero
Civil

Asesor:

- Ing. Romulo Rivera Quiroga

CUSCO-PERU

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: "Diseño e Implementación de un equipo electrónico para la medición de la humedad y Temperatura de placas en el distrito de San Sebastián"

presentado por: Moclymir Efraim Madera Olivera con DNI Nro.: 11147278

presentado por: _____ con DNI Nro.: _____

para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero civil

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 21 de febrero de 2021

[Firma]
Firma

Post firma.....

Nro. de DNI..... 23828120

ORCID del Asesor..... 0009-0003-7757-8660

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: https://unsaac.turnitin.com/519

Código Oid: 27259:333956503

NOMBRE DEL TRABAJO

Diseño e implementación de un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelo

AUTOR

Vladimir Efraim Madera Olivera

RECUENTO DE PALABRAS

21467 Words

RECUENTO DE CARACTERES

116622 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

105 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

14.3MB

FECHA DE ENTREGA

Feb 21, 2024 12:18 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Feb 21, 2024 12:20 PM GMT-5

● 10% de similitud general

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

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)

DEDICATORIA

*A mis padres **Efraín y Alicia**, por su amor, ejemplo y sacrificio. Siempre serán mis ángeles y la luz que alumbra mi sendero. A mi adorada esposa **Carla**, por su colaboración, paciencia y comprensión brindada, a lo largo de este andar académico, **mis hijos Mauricio y Nicolás**, quienes aún están forjando su destino.*

AGRADECIMIENTO

*A mi esposa **Carla**, por su apoyo incondicional, a mi hermana **Karina**, por su persistencia para lograr este título; a mis tíos **Guiulfo y Belen**, por brindarme sus espacios para realizar los trabajos de campo; a mi tía **Meche**, por el cariño incondicional; a mi cuñada **Melina**, por su apoyo moral.*

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Problemática.....	1
1.2. Propuesta Técnica del Equipo	5
1.2.1. Fundamento técnico del equipo diseñado.....	5
1.3. Factibilidad de la Propuesta Técnica.....	9
1.4. Diferencias con los Equipos Existentes.....	10
1.5. Formulación del Problema	11
1.5.1. Problema general	11
1.5.2. Problema específicos	11
1.5.3. Justificación de la investigación	11
1.6. Objetivos de la Investigación	13
1.6.1. Objetivo general	13
1.6.2. Objetivos específicos	14
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	15
2.1. Bases Teóricas.....	15
2.1.1. Variabilidad de las mediciones.....	15
2.2. Contenido de Humedad del Suelo	18
2.2.1. Contenido volumétrico de humedad de un suelo.....	19

2.3.	Relaciones Gravimétricas y Volumétricas del Suelo	19
2.3.1.	Límites de consistencia en suelos	21
2.3.2.	Contenido de humedad en suelos granulares.....	23
2.4.	Ensayos en Laboratorio del Contenido de Humedad	24
2.4.1.	Agua de constitución	24
2.4.2.	Agua de adsorbida	24
2.4.3.	Métodos gravimétricos	25
2.4.4.	Métodos volumétricos	25
2.4.5.	Métodos tensiométricos.....	29
2.5.	Ensayos en Campo del Contenido de Humedad	30
2.5.1.	Gravimétrico.....	30
2.5.2.	Resistencia eléctrica	30
2.5.3.	Difusión de calor	31
2.5.4.	Absorción	31
2.5.5.	Tensiométrico	32
2.5.6.	Penetrométricos	35
2.5.7.	Radioactivos	35
2.5.8.	Marco Conceptual.....	37
2.6.	Antecedentes de la Investigación	38
2.6.1.	Antecedentes Internacionales	38
2.6.2.	Antecedentes nacionales.....	43
2.6.3.	Antecedentes locales.....	45
2.7.	Hipótesis.....	46
2.7.1.	Hipótesis General	46
2.7.2.	Hipótesis Específicas	46
2.8.	Identificación de Variables e Indicadores	46
CAPÍTULO III. DISEÑO DEL DISPOSITIVO.....		47

3.1. Diseño del Sensor de Humedad.....	47
3.2. Proceso de Ensamblado del Sensor de Humedad.....	50
3.3. Diseño del Sensor de Temperatura.....	50
CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO	52
4.1. Construcción del Dispositivo	52
4.1.1. Descripción de dispositivo	52
4.1.2. Componentes del sistema (hardware).....	52
4.1.3. Componentes del sistema (hardware).....	55
4.1.4. Código de programación	55
4.2. Calibración del Dispositivo	57
4.2.1. Proceso de calibración del equipo	57
CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO	60
5.1. Perforación de las Auscultaciones.....	60
5.2. Inserción del Sensor	60
5.3. Recolección de Datos	62
5.4. Muestreo en Campo con el Instrumento.....	62
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	65
6.1. Análisis de los Datos de Calibración en Campo del Instrumento	65
6.1.1. Predicción de la humedad.....	66
6.1.2. Predicción de la temperatura.	76
CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
7.1. Conclusiones	78
7.2. Recomendaciones	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	20
Tabla 2.....	59
Tabla 3	65
Tabla 4	75
Tabla 5.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las partes del equipo propuesto	7
Figura 2. Sensor comercial de humedad	10
Figura 3. Representación esquemática de contenido volumétrico del agua en el suelo.	19
Figura 4. (a) Elemento de suelo en estado natural; (b) tres fases del elemento de suelo.	19
Figura 5. (a) Plasticidad de los suelos cohesivos y de grano fino.	22
Figura 6. Idealización de la suspensión de partículas del suelo respecto de sus límites de consistencia	22
Figura 7. Idealización de la constante dieléctrica del suelo.....	26
Figura 8. Speedy 2000 Determinador de humedad.....	34
Figura 9. Sonda del instrumento	47
Figura 10. Placa Arduino UNO	47
Figura 11. Pantalla LCD 2x16	48
Figura 12. Bateria recargable.....	48
Figura 13. Esquema de penetración del instrumento	49
Figura 14. Sonda del instrumento	50
Figura 15. Esquema del sensor de temperatura	50
Figura 16. Vista de una placa Arduino NANO.....	53
Figura 17. Vista de un cable AB	53
Figura 13. Vista de un sensor de humedad	54
Figura 19. Dispositivo terminado para calibración.....	57
Figura 20. Pesado del suelo	58
Figura 21. Detalles del tubo	59
Figura 22. Perforación de la auscultación.....	60
Figura 23. Colocación del sensor y el instrumento.....	61
Figura 24. Inserción del sensor dentro del agujero de auscultación	61
Figura 25. Toma de datos en campo con el sensor	62

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. <i>Panel fotográfico de trabajos de campo y laboratorio</i>	87
Anexo 2. <i>Especificaciones de fábrica del sensor</i>	91
Anexo 3. <i>Norma referida a la humedad</i>	92
Anexo 4. <i>Detalles adicionales del equipo</i>	93

RESUMEN

La presente tesis titulada, “Diseño e implementación de un equipo para la medición de la humedad y temperatura de los suelos en el distrito de San Sebastián”, ha sido realizada con sensores, cables, tableros de lectura, batería de litio y cargadores eléctricos; a los cuales se pueden acceder en cualquier mercado, para difundir el uso y aplicación de sensores de bajo costo en la medición de la humedad y temperatura de los suelos. La presente investigación servirá para que los profesionales de la diferentes ramas de la ingeniería en especial de la Ingeniería Civil y la Geotecnia, puedan tener un acceso masivo y a bajo costo de datos de la humedad de los suelos, asimismo este equipo electrónico permitirá a los ingenieros residentes y supervisores de obras viales, estabilidad de taludes, obras estructurales en las que el contenido de humedad del suelo varía periódicamente y otros, tener una herramienta de control más económica y accesible, pues los resultados podrán interpretarse in situ, como sabemos actualmente para los ingenieros determinar la humedad y de los suelos conlleva un alto costo y tiempo.

El monitoreo de humedad constituye una actividad fundamental para el diseño y ejecución de obras viales, de estabilización de taludes, y de cimentaciones durante la práctica de la ingeniería civil.

Palabras claves:

Diseño e implementación, equipo electrónico, medición de la humedad de suelos, calibración.

ABSTRACT

The present thesis entitled, "Design and implementation of a technical equipment for the measurement of soil moisture in the district of San Sebastian", has been carried out with sensors, cables, reading boards, lithium battery and electric chargers; which can be accessed in any market, to spread the use and application of low-cost sensors in the measurement of soil moisture. This research will help professionals from different branches of engineering, especially Civil Engineering and Geotechnical Engineering, to have a massive and low cost access to soil moisture data, also this electronic equipment will allow resident engineers and supervisors of road works, slope stability, structural works in which the moisture content of the soil varies periodically and others, to have a more economical and accessible control tool, because the results can be interpreted in situ, as we know currently for engineers to determine the moisture and soils involves a high cost and time.

Moisture monitoring is a fundamental activity for the design and execution of road works, slope stabilization, and foundations during the practice of civil engineering.

Keywords:

Design and implementation, electronic equipment, soil moisture measurement, calibration.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se señala información general sobre la tesis. En primer lugar, se detalla la situación problemática, luego se formula el problema de investigación, se hace un análisis justificativo de la misma, para luego continuar con la definición de los objetivos.

1.1. Situación Problemática

La medida de agua presente en espacios vacíos del suelo dividida por la masa de partículas sólidas de esa sustancia, expresada en porcentaje, se conoce como humedad en el suelo. Esta característica influye en el comportamiento del suelo, por lo que es un componente crucial en la ingeniería geotécnica. Las conexiones de la etapa del agua, el aire y los objetos en un determinado volumen o peso del material se expresan mediante el contenido de humedad del suelo. En el caso de los suelos cohesivos, la consistencia relativa de un determinado suelo se manifiesta mediante su consistencia, así como de sus límites líquido y plástico (Nobahar et al., 2022).

Medir el volumen de agua en el suelo es el principal objetivo de la prueba de contenido de humedad. Los ingenieros geotécnicos pueden identificar los tipos de suelo, diagnosticar su comportamiento, determinar la capacidad portante y construir terraplenes, muros de contención y cimientos con ayuda de los resultados de las pruebas (Hu & Zheng, 2013).

Hay dos formas de calcular el contenido hídrico del suelo: directa e indirectamente. Las técnicas directas incluyen el uso de solutos y procesos químicos para separar el agua del suelo o, de forma más convencional, el secado al horno. Aunque este último método es el más preciso para medir la humedad del suelo, no se puede medir en tiempo real y es destructivo (Kargas & Soulis, 2012).

Sin embargo, existen diversas técnicas indirectas no destructivas, desde la teledetección hasta la escala de puntos, que permiten un seguimiento muy preciso de la humedad del suelo. Además, para controlar la concentración de agua en el suelo en aplicaciones a escala de campo, como el riego, se requiere una amplia cobertura espacial y un seguimiento no destructivo en tiempo real, lo que puede resultar caro (Payero et al., 2017).

En el caso de las vías terrestres la ingeniería civil utiliza el suelo como elemento constructivo, además de usarlo como fundación (Lambe & Whitman, 2004)

al igual que en cualquier creación humana, en los proyectos de construcción, el seguimiento de la calidad desempeña un papel crucial para cumplir con las especificaciones estructurales, arquitectónicas y de seguridad. Además, contribuye a garantizar la comodidad de quienes utilizan (ARSA, 2018). En otra perspectiva, la supervisión de los resultados de un proyecto particular con el objetivo de comprobar el apego a las normas de calidad correspondientes se conoce como control de calidad. Este proceso generalmente resulta indispensable para identificar y eliminar los motivos de un rendimiento deficiente. (Lakshmi, 2015).

Una dimensión esencial de la gestión de calidad es la adherencia a las directrices, concepto que se define como el nivel que la producción de algún producto se ajusta de manera precisa según los detalles técnicos diseñados. En este contexto, la calidad guarda una relación inversamente proporcional con la variabilidad, la cual puede describirse únicamente en parámetros de estadística. Por otra parte, el valor que coincide con la medida deseada referente a una propiedad específica de calidad se conoce como valor estándar o meta para esa calidad. Los estándares objetivos generalmente se encuentran definidos por un intervalo de valores, generalmente considerados lo suficientemente cercanos al propósito de manera que no incida en la funcionalidad ni en el desempeño del resultado. (Montgomery, 2009).

Dado que es esencial evaluar el nivel de superioridad del artículo, como una obra civil, mediante la medición de sus características para verificar su conformidad con las características tácticas de la proyección, y considerando que la medición implica conectar cifras con medidas y fenómenos físicos, se destaca que este proceso desempeña un papel fundamental en disciplinas como la ingeniería, la construcción y otras áreas técnicas (Encyclopædia Britannica, 2016), además, es importante señalar que la metrología se ocupa de la utilización de instrumentos de medida, la comparación entre ellos y la evaluación de las incertidumbres asociadas a dichas mediciones (Tal, 2017). Se puede inferir que, tanto en los ensayos de suelos como en cualquier laboratorio, es esencial llevar a cabo la toma de medidas y su registro, lo cual requiere el uso de equipos e instrumentos eficaces en términos de gastos y periodo. (Head, 2006).

En la evaluación de la distinción de los productos, particularmente en el caso del suelo, se utilizan herramientas especializadas. El gasto de los análisis generalmente refleja los gastos asociados con los equipos e instrumentos necesarios para llevar a

cabo dichas pruebas. Por ejemplo, en el Laboratorio de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se ofrecen ensayos con precios que oscilan desde S/. 9.62 para el Refrentado de Testigos Cilíndricos de Concreto (Capping) hasta S/. 2295 para un ensayo de Compresión Triaxial Consolidado drenado para Suelos Cohesivos (CD) - Limos y Arcillas. (MTC, 2015).

En relación con la concentración de agua en un suelo, es fundamental tener en cuenta que, con el fin de un análisis geotécnico, los suelos en términos generales se componen de tres fases distintas: aire, agua y sólidos. Determinar el espacio libre en un suelo específico y la cantidad de humedad existente es esencial para calcular peso por unidad de extensión en el terreno. Además, la humedad, detallada como una proporción, en el cual acontece la modificación del estado sólido al estado parcialmente sólido se establece como el extremo de retracción. El límite plástico y el límite líquido son dos propiedades importantes que caracterizan el comportamiento del suelo en función de su contenido de humedad. El límite plástico marca la transición entre un estado semisólido y uno plástico, definiendo el punto en el cual el suelo puede ser moldeado sin romperse. Por otro lado, el límite líquido indica el punto en el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido, representando la capacidad del suelo para fluir. Son conocidos como límites de Atterberg. (Das, 2015). Es evidente, por lo tanto, que la humedad del suelo tiene un impacto en su comportamiento mecánico.

Un ejemplo destacado que ilustra cómo la humedad afecta el comportamiento del suelo se observa en el origen fundamental de densificación. En este proceso, la densidad seca unitaria experimenta un aumento inicial a medida que se incrementa el contenido de humedad durante el proceso de compactación. Sin embargo, más allá de un punto específico de contenido de higrometría, todo incremento adicional suele disminuir la densidad seca. (Das, 2015).

La evaluación del contenido de humedad desempeña una función crucial en el para medir las condiciones del suelo en proyectos de construcción civil, y es cierto que hay varios métodos e instrumentos disponibles para llevar a cabo esta determinación. El método ampliamente aceptado en términos de precisión y exactitud se conoce como el "Método estándar para la determinación del contenido de agua en suelos y rocas por masa".(ASTM, 2010). Existen diversas técnicas para medir la proporción hídrica del suelo, que incluyen enfoques relativos a la conductividad eléctrica. Los gastos de la

maquinaria utilizada en estos enfoques varían ampliamente, oscilando desde los US\$ 75 hasta los US\$ 12000. Además, los periodos requeridos para que las herramientas proporcionen lo que se requiere varían a partir de tan solo 30 segundos hasta dos días. (Sebesta, Oh, Lee, Sanchez, & Taylor, 2013).

Los costos para la realización del ensayo de contenido de agua varían entre los laboratorios del país. Por ejemplo, en el laboratorio de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima, este ensayo tiene un costo de S/. 30 según su tarifario. (UNI, 2017), Los precios establecidos por el Ministerio de Transportes indican un valor de S/. 15.28. (MTC, 2015), la Universidad Javeriana de S/. 14.21 (Universidad Javeriana, 2017); De manera similar, el sitio web www.peru.generadordeprecios.info indica un costo de S/. 13.15 para la misma prueba de contenido hídrico mediante procedimiento de secado en horno. El método implica la determinación de la medida de higrometría del suelo como la proporción, representada en proporción, dentro de una muestra de suelo relativa al peso de los componentes sólidos. Este proceso se lleva a cabo al someter una muestra de suelo a un periodo de secado prolongado en un horno de desecación con control de temperatura, preferiblemente de categoría ventilación forzada, debido a su eficiencia. (LLORVESA, 2018), con la aptitud de conservar un nivel de calor de 110 ± 5 °C (MTC, 2000).

La revisión según un análisis, se evidencia una sólida relación trayectoria curva entre la resistencia del lecho y la humedad. A medida que se prolonga el período al estar sumergido, la resistencia del lecho baja a consecuencia de mayor proporción de agua. El cambio en la resistencia de la subrasante cuando cambia el contenido de humedad fue de 1 a 7 veces mayor durante la inmersión de cuatro días esto con base a los hallazgos en la sala de pruebas y el examen de esta investigación son relevantes para los componentes empleados y los estándares para realizar pruebas establecidas. (Mohamed, 2015).

En contraste, los mecanismos computarizados suelen implementarse en situaciones que demanden rapidez y exactitud. Un sistema informático estándar opera siguiendo el principio de "entrada-proceso-salida". En el contexto de los sistemas actuales, los datos son reemplazados por sondas pertinentes. (Tripathy & Anuradha, 2018).

Igualmente, el avance tecnológico de medición se posiciona como un implemento crucial en el campo investigativo, desempeñando un rol fundamental en

el entorno contemporáneo. Esta ciencia aplicada no solo contribuye a anticipar diversos acontecimientos, sino que también potencia la productividad y eficacia de las actividades. Al mismo tiempo, mantenerse actualizado y emplear las tecnologías más recientes se convierten en factores esenciales que incrementan de manera significativa el desempeño competitivo, buscando alternativas más económicas, dispositivos más compactos, equipos con mayor eficiencia energética y sensores de mayor confianza (Belov, 2014).

Los sistemas sensoriales asequibles se describen como una ciencia transductora diseñada inicialmente dirigido al consumidor, y su precio disminuido se atribuye a la explotación de eficiencias operativas. Estos avances emplean comúnmente detectores que posibilitan otras funcionalidades que favorecen un uso más rentable del rastreo en contextos productivos, logística y procesos. (DHL, 2013). En el mercado, es posible hallar sensores de humedad del suelo disponibles a partir de los 33 centavos de dólar cada uno, como un ejemplo. (Alibaba.com, 2018).

Es evidente el alcance del empleo de avances tecnológicos emergentes, especialmente de sensores económicos, en el ámbito de la inspección de obras civiles, especialmente en el campo del análisis geotécnico, para el aseguramiento de la calidad del terreno. No obstante, debido a su limitada difusión, surge la necesidad de comprender la variación de los resultados al utilizar los elementos, ya que la práctica común tradicional implica la determinación del nivel de humedad mediante el procedimiento de secado en horno, cuyos resultados son reconocidos como puntos de referencia para calibrar otras técnicas.

1.2. Propuesta Técnica del Equipo

A continuación, se detallan los fundamentos técnicos, la factibilidad y la originalidad de la propuesta técnica materia de la presente investigación.

1.2.1. Fundamento técnico del equipo diseñado

Los sensores capacitivos de humedad del suelo son dispositivos que miden la permisividad del suelo, la cual guarda conexión con su contenido de agua. Estos sensores son atractivos por su bajo costo, su bajo consumo de energía y su idoneidad para las redes inalámbricas. Sin embargo, también tienen algunas limitaciones, como la sensibilidad al tipo de suelo, la temperatura y la salinidad. Por lo tanto, necesitan una calibración y validación adecuadas para garantizar mediciones fiables.

Por otro lado, los sensores de temperatura operan bajo el principio de los termopares y funcionan bajo el principio conocido como el efecto Seebeck. Cuando dos cables hechos de metales diferentes se unen y se calientan en un extremo, se forma un circuito termoeléctrico que causa un diferencial de voltaje medible conocido como el voltaje de Seebeck en el extremo "frío". Un pareado dado de metales varía en el rango de temperatura, sensibilidad y error en función de las propiedades de esos metales.

Los sensores capacitivos de humedad del suelo pueden utilizarse para controlar las condiciones ambientales dentro de los invernaderos y optimizar el sistema de riego. También pueden utilizarse para estimar las características del suelo, como la porosidad y la densidad, midiendo la permitividad del suelo. Además, pueden utilizarse para evaluar la cantidad de humedad de materiales granulares no ligados en capas de pavimento, lo que afecta a su resistencia y rigidez. Los sensores capacitivos de humedad del suelo pueden proporcionar datos en tiempo real para estas aplicaciones, pero requieren una instalación y un mantenimiento cuidadosos para evitar errores y ruidos (Alsharif et al., 2021; Cimmino et al., 2020; Johnson & Clyne, 2020).

Utilizando la aptitud del suelo para enviar ondas o pulsos magnéticos eléctricos, se puede determinar la medida de agua existente en el suelo a través de la capacitancia. En esencia, se intercalan dos placas eléctricas entre el suelo y se detecta una frecuencia cuando se introduce tensión en las placas. A continuación, se utiliza una ecuación de calibración para traducir esta frecuencia en milímetros de humedad del suelo por metro (*Measuring Water in Soil - Capacitance - Department of Environment, ..., n.d.*).

Existen sistemas con distintas capacitancias. Es posible que los sistemas permanentes registren continuamente lecturas a intervalos precisos. Para las plantaciones permanentes se dispone de una gran variedad de elementos, incluidos cultivos de rápido crecimiento en zonas de raíces poco profundas y vides. Las lecturas pueden descargarse manualmente desde cada emplazamiento, por teléfono o mediante sistemas de transmisión automatizada a un ordenador. El número de emplazamientos e intervalos de profundidad admitidos varía según los sistemas (*Measuring Soil Moisture with ADCs - Circuit Cellar, n.d.*).

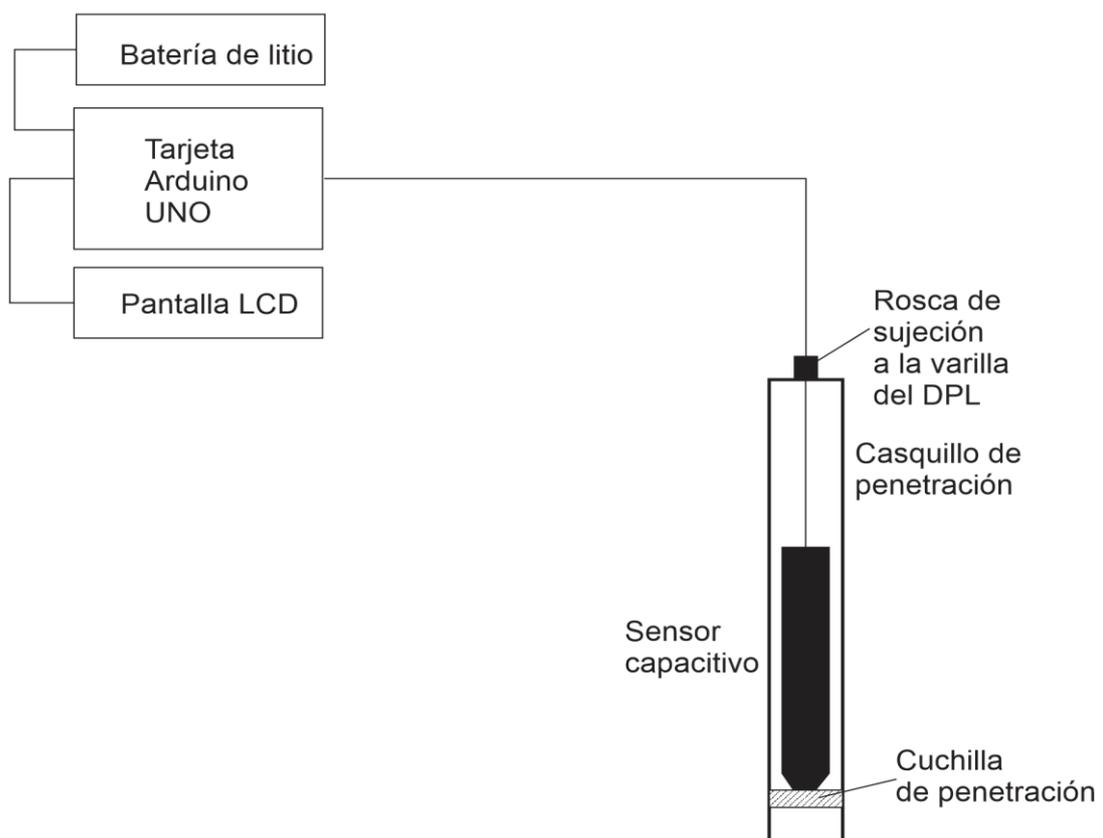
Como se ha explicado anteriormente, la medición del suelo se realiza mediante sondas de capacitancia portátiles. Este sistema difiere de uno permanente

principalmente en que las lecturas tienen que obtenerse manualmente utilizando la sonda, que tiene un único sensor en el extremo. Mediante un tubo de acceso, la sonda se desplaza por el perfil, tomando lecturas cada 10 centímetros. Los datos recogidos pueden trazarse para crear un gráfico que muestre el contenido de humedad del suelo a distintas profundidades del perfil. Los datos pueden examinarse en la unidad de visualización sobre el terreno o descargarse en un ordenador, según el sistema que se elija (Mukhlisin et al., 2021).

El dispositivo diseñado se puede describir como una sonda que se introduce en un agujero previamente excavado. La sonda mide 15 cm de longitud y está fabricada en un tubo de acero de 35 mm de diámetro.

Figura 1

Esquema de las partes del equipo propuesto



Arduino es una plataforma de código y hardware abierto que se fundamenta en hardware y software de libre acceso. Se caracteriza por ser flexible y fácil de utilizar,

siendo una opción idónea para creadores y desarrolladores. Es una placa de desarrollo de microcontroladores que posibilita la creación de distintas clases de microcomputadoras de monoplaca que son utilizadas por el grupo de innovadores puede dar distintos tipos de uso. La placa Arduino Se fundamenta en un controlador microprogramable ATMEL AVR, que consiste en un chip donde es posible registrar órdenes. Estas instrucciones Se redactan utilizando la codificación compatible con el ambiente de evolución integrado (IDE) de Arduino. Estas directrices posibilitan la creación de programas que se comunican con los componentes de la placa.

Para empezar con Arduino Uno, se necesita una placa Arduino y el software Arduino. Se escribe el código en un formato específico y se carga el código directamente en la placa Arduino. También se conectan los periféricos y los sensores. A partir de ese momento, la placa Arduino ejecutará el código cada vez que se encienda hasta que se apague.

Un tipo particular de batería de iones de litio con medidas de 65 mm de longitud y 18 mm de diámetro es la batería 18650. La capacidad de la pila, o la cantidad de energía que puede almacenar, se indica mediante la clasificación 4200mAh.

Una pila recargable funciona según el principio fundamental de que la reacción química que tiene lugar durante la descarga puede invertirse para iniciar una recarga. Mientras que el electrodo negativo (ánodo) absorbe electrones durante la descarga, el electrodo positivo (cátodo) libera electrones que alimentan un dispositivo a través de un circuito externo. El proceso de invertir el flujo de electrones del cátodo al ánodo se lleva a cabo durante la recarga de la batería a través de la utilización de una provisión de energía exterior. De este modo, se restablece la composición química original de los electrodos, lo que permite reutilizar la batería.

Así funciona también la pila recargable 18650. Tiene una célula de iones de litio, que se compone de una solución electrolítica que facilita el movimiento de iones entre los electrodos, un cátodo de grafito y un ánodo de óxido de litio y cobalto. Los iones de litio migran a través de la solución electrolítica desde el electrodo positivo al negativo durante la descarga, liberando electrones que alimentan un dispositivo al pasar por un circuito externo. Los iones de litio vuelven del electrodo negativo al positivo durante la recarga de la batería gracias a la utilización de una fuente de energía exterior.

La pantalla LCD 16x2 funciona enviando comandos y datos desde un microcontrolador al módulo de visualización. El microcontrolador controla la pantalla enviando instrucciones específicas para fijar la posición del cursor, mostrar caracteres o ajustar el contraste. La biblioteca LiquidCrystal habilita la gestión de pantallas LCD que son conformes con el controlador Hitachi HD44780. Existen diversos tipos, generalmente, se pueden distinguir por la interfaz de 16 pines. Las pantallas LCD poseen una conexión simultánea, lo que implica que el microcontrolador debe gestionar varios pines de la interfaz simultáneamente para dirigir la pantalla. La interfaz está compuesta por los siguientes pines:

Un terminal de elección de registro (RS) que regula en qué segmento de la memoria del LCD se están ingresando los datos. Puede optarse por el registro de datos, que alberga lo que se muestra en la pantalla, o un registro de instrucciones, en el cual el controlador de la LCD busca las indicaciones sobre las acciones a llevar a cabo.

Una terminal de Lectura/Escritura (R/W) que determina si se encuentra en modo de lectura o escritura.

Un terminal Enable que permite la escritura en los registros.

Ocho terminales de datos (D0 - D7). Los estados de estos terminales (alto o bajo) representan los bits que se ingresan en un registro durante una operación de escritura, o los valores que se obtienen durante una operación de lectura.

Un pin de contraste de pantalla (Vo), terminales de suministro de energía (+5V y GND), así como terminales de retroiluminación LED (Bklt+ y Bklt-) que son empleados para proporcionar energía a la pantalla LCD, regular el contraste y activar o desactivar la retroiluminación LED, respectivamente.

El proceso de manejo de pantalla implica poner la información que compone la representación visual de lo que se pretende exhibir en los registros de datos, posteriormente, poner los comandos en el registro de instrucciones. La librería LiquidCrystal agiliza este proceso sin necesidad de conocer las instrucciones de bajo nivel.

1.3. Factibilidad de la Propuesta Técnica

Los componentes electrónicos se hallan en pleno desarrollo, siendo posible encontrarlos por separado e individualmente en distintos mercados en línea, por lo

general son importados y su costo varía de acuerdo al país de procedencia. Para la presente investigación, se adquirieron productos de un fabricante chino que cumplan con determinados criterios técnicos de calidad, pero sobre todo cuya relación de costo calidad sea la más eficiente para los propósitos de la tesis.

Los costos y fabricación de los sensores varían en un rango de US\$ 4 hasta los US\$ 800, por cada sensor, en algunos casos los vendedores empaquetan sus soluciones vendiendo además del mismo hardware, el software y la adquisición de datos, lo cual incrementa el sistema total.

La presente investigación diseñó un equipo completo, concebido como un sistema de medición el cual tendrá múltiples componentes, siendo que la meta sea que el costo de la información obtenida a partir de éste sea muy bajo y que la fabricación del mismo no supere los US\$ 100 por el equipo completo.

Es de mencionarse que actualmente la empresa Meter Group comercializa estos dispositivos a un costo equivalente a \$450 por unidad, y \$150 adicionales por el lector de datos que puede leer los datos de hasta ocho sensores.

Figura 2

Sensor comercial de humedad



Nota. Fuente: Meter Group.

1.4. Diferencias con los Equipos Existentes

Todos los equipos existentes están constituidos por una sonda, un chip, un cable y alguna forma de obtención de datos, sean estos sensores de los más básicos o los de alto costo.

Multipunto. En principio, la propuesta de la presente tesis pretende implementar un arreglo modular de sensores multipunto, con la finalidad de mejorar sustancialmente la precisión y representatividad de las lecturas, como se sabe, la precisión de cualquier estadística muestral aumenta (es decir, su error estándar disminuye) en proporción a la raíz cuadrada del tamaño de la muestra. Entonces, si la Prueba A tiene cuatro veces más muestras que la Prueba B, entonces los resultados de la Prueba A serán dos veces más precisos que (es decir, tienen la mitad del error estándar de) los resultados de la Prueba B, porque la raíz cuadrada de cuatro es dos (www.dummies.com). De manera que, el equipo propuesto constara hasta de una única sonda.

1.5. Formulación del Problema

1.5.1. Problema general

¿Cómo se puede implementar y evaluar un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos en el distrito de San Sebastián?

1.5.2. Problema específicos

- a) ¿Cuáles son los componentes de un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos?
- b) 2.- ¿Cómo será la implementación del equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos según el diseño propuesto por la presente investigación?
- c) 3.- ¿Cuáles serán los resultados de la evaluación de la humedad en suelos en el distrito de San Sebastián aplicando el equipo electrónico implementado?

1.5.3. Justificación de la investigación

- Un componente esencial de la ingeniería geotécnica es la regulación del contenido de humedad del suelo. La predicción de riesgos geológicos y la comprensión de los procesos hidrológicos son beneficiosas. La oscilación del contenido de la humedad del suelo regula el desarrollo de las plantas, el ciclo del nitrógeno y la actividad microbiana, todos ellos procesos críticos para preservar la salud y la productividad del suelo. La humedad del suelo también impacta en sus cualidades técnicas, como la permeabilidad, la compresibilidad y la fuerza del deslizamiento. Para garantizar la firmeza de las estructuras

erigidas sobre el suelo y evitar desprendimientos, es crucial controlar el nivel de humedad.

- En el campo de la ingeniería civil, el uso de tecnologías modernas como Arduino ha revolucionado el sector. Los ingenieros pueden diseñar sistemas y objetos electrónicos interactivos con Arduino, una plataforma electrónica de código abierto. Se trata de una plataforma fácil de usar y a un precio razonable para el seguimiento y la gestión de distintas partes de las obras de Ingeniería civil.
- La monitorización de la salud estructural es uno de los usos más importantes de Arduino en ingeniería civil. Implica el uso de sensores para vigilar la solidez estructural de puentes, edificios y otras infraestructuras. Los sensores detectan la temperatura, la humedad, las vibraciones y otras variables que pueden indicar un colapso o daño estructural. Gracias a estos datos, es posible anticipar posibles problemas y ponerles remedio antes de que empeoren.
- Los sistemas de riego inteligentes son otro campo en el que se utiliza Arduino en ingeniería civil. Para calcular cuándo y cuánta agua administrar a los cultivos, estos sistemas utilizan sensores que rastrean los niveles de humedad del suelo y las condiciones meteorológicas. Esto reduce el impacto de la agricultura en el medio ambiente y ayuda a conservar el agua.
- Los sistemas para gestionar el tráfico también pueden utilizar Arduino. Para optimizar las señales de tráfico y mejorar la fluidez del tráfico, se pueden recopilar datos sobre el flujo de tráfico, la velocidad y la congestión.
- En conclusión, el campo de la ingeniería civil ha experimentado una transformación gracias al uso de nuevas tecnologías como Arduino. Ha permitido supervisar y controlar de forma más eficaz y eficiente diversos aspectos de los proyectos de ingeniería civil de lo que se podía hacer antes. Las futuras aplicaciones de Arduino deberían ser aún más interesantes a medida que se sigan desarrollando nuevas tecnologías.
- La tesis resulta beneficiosa, ya que busca promover la aplicación de sensores de bajo costo para la adquisición de características geotécnicas del suelo.
- Relacionado a su importancia para la sociedad, este estudio proporcionará a profesionales de diversas disciplinas de la ingeniería, especialmente en Ingeniería Civil y Geotecnia, la posibilidad de acceder de manera amplia y

económica a datos de humedad del suelo. Además, los hallazgos obtenidos concederán a ingenieros locales y externos de proyectos viales contar con un recurso complementario para el aseguramiento de calidad asequible y al alcance. Posibilita contribuir a toma de elecciones más efectivas para las edificaciones, mejorando así la calidad del gasto en proyectos de proyectos públicos.

- El presente equipo electrónico será de uso directo en determinar la humedad sustituyendo a los equipos existentes ya que estos requieren costo y tiempo.
- La incertidumbre asociada con la precisión de estos sensores puede afectar las elecciones en propuestas y geotecnia. En este contexto, la investigación busca no solo evaluar la eficacia de los sensores de bajo costo, sino también proporcionar una base sólida para su implementación generalizada en diversas disciplinas de ingeniería. La disponibilidad asequible de datos precisos de humedad del suelo podría tener una influencia significativa en la calidad y eficiencia de las iniciativas de construcción y obras públicas, mejorando así la dirección de elecciones y supervisión de medios.
- La intención de este estudio es establecer los cimientos para extender el análisis de la variabilidad de distintos sensores en el campo de la geotecnia, dado que los principios y métodos serán análogos.
- Además, esta tesis contribuye al avance de las tecnologías, debido a que sus hallazgos posibilitarán evaluar la efectividad de la implementación de detectores novedosos en los procesos de recopilación de información sobre los atributos geotécnicos del suelo.
- Indudablemente, esta tesis contribuirá a la generación de instrumentos y técnicas novedosas para la recopilación, análisis y procesamiento de datos tanto en el terreno como en el laboratorio, específicamente en el ámbito de la geotecnia.

1.6. Objetivos de la Investigación

1.6.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y evaluar un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos en el distrito de San Sebastián.

1.6.2. Objetivos específicos

Para los objetivos de la presente investigación se han determinado:

- a) Diseñar los componentes del equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos.
- b) Implementar el equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos.
- c) Evaluar el equipo electrónico haciendo mediciones en el distrito de San Sebastián.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Variabilidad de las mediciones

Se refiere a la propensión de la toma de medidas a generar cuantificaciones ligeras distintas para un el mismo espécimen de ensayo, ya sea que los criterios para medir se mantengan constantes o experimenten cambios. Se identifican dos orígenes de variación temporal: variación temporal inmediata asociada al rigor del instrumento y la variabilidad prolongada vinculada a las alteraciones en el entorno y las prácticas de manipulación (Laboratorio de Tecnología de la Información), 2018).

La diversidad inherente se encuentra asociada a la imprevisibilidad intrínseca de los procedimientos naturales, manifestándose como variación temporal para sucesos que acontecen en una ubicación específica (variación temporal) o como variación espacial para fenómenos que tienen lugar en diversas ubicaciones, pero durante el mismo lapso de tiempo (variación espacial), o bien, como variabilidad tanto temporal como espacial. Esta diversidad intrínseca es explorada por medio de simplificaciones o modelos matemáticos aproximados. (Baecher & Christian, 2003).

Las mediciones en un conjunto de datos pueden ofrecer información clave sobre la distribución y la estructura de los valores observados. Por un lado, los indicadores de tendencia central, como el promedio, suministran un indicador del valor promedio en el conjunto de datos, representando así una especie de punto central alrededor del cual se agrupan los demás valores. Por otro lado, los estándares de variabilidad, como la dispersión típica o el rango, indican cuánto se extienden los valores en relación con la medida central. Estas medidas ofrecen insights sobre la homogeneidad o la dispersión de los datos, permitiendo una comprensión más completa de la distribución y la variabilidad de la información recopilada. En conjunto, estas medidas ayudan a caracterizar la naturaleza y la estructura del conjunto de datos, proporcionando herramientas valiosas para el estudio estadístico. (Sani & Todman, 2006).

Cuando hablamos de variabilidad, nos referimos a que observaciones consecutivas de un sistema o fenómeno no generan resultados idénticos. Hay diversas fuentes de variabilidad asociadas a un fenómeno.

Frecuentemente, se utilizan dos valores para sintetizar una función de probabilidad de una variable estocástica. La media sirve como indicador del centro o punto medio de la ley de frecuencia, mientras que la covarianza consigo misma proporciona parámetro de la dispersión en dicha disposición. Estos valores representan síntesis elementales y prácticos de la repartición estadística asociada a la variable. (Montgomery & Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers, 2003).

La regresión se inserta dentro de un concepto aún más fundamental en estadística y experimentación: la variabilidad. La variabilidad es inherente a prácticamente todas las mediciones; ninguna observación es idéntica a otra. Cada vez que se realiza un experimento repetido, incluso bajo condiciones aparentemente controladas, se evidencia alguna diferencia en los resultados. Esta variación puede deberse a diversos factores, como fluctuaciones naturales, errores de medición o incluso factores no contemplados. Reconocer y comprender la variabilidad es esencial para interpretar de manera adecuada los resultados de experimentos y análisis estadísticos, y la regresión es una herramienta que ayuda a modelar y entender estos patrones de variabilidad en los datos. (Cohn, 2012).

La diversidad percibida en un procedimiento se divide en dos orígenes fundamentales: la diversidad entre los elementos, que representa la variación en las mediciones entre diversos componentes; y la variación del sistema de evaluación, que engloba toda la diversidad asociada con el procedimiento de evaluación, incluyendo aparatos, procedimientos, el contexto, entre otros. La diversidad del sistema de evaluación se divide en dos categorías: consistencia, ocasionada por el dispositivo de evaluación (cuando un mismo operador evalúa la misma parte varias veces utilizando el mismo sistema de evaluación bajo condiciones idénticas); y reproductibilidad, generada por el sistema de evaluación (cuando distintos operadores evalúan la misma parte varias veces con el mismo sistema de evaluación y bajo las mismas condiciones). La reproductibilidad puede dividirse a su vez en dos orígenes:

Además, se utiliza un estudio de disimilitud para examinar la diversidad entre conjuntos de datos. Puesto que computamos la disimilitud entre los conjuntos, es esencial que el tamaño de la muestra (n) sea consistente en cada conjunto; es necesario que se promedie el mismo número de puntuaciones en cada grupo. (Privitera, 2015).

La matemática facilita un instrumento para evaluar estructuras en las cuales solo se altera un criterio, conocido como "Experimentación Planificada" (EP por sus

iniciales en inglés). La utilidad más sobresaliente de los experimentos diseñados matemáticamente es que proveen más detalles que la experimentación no planificada. Un segundo provecho es que el diseño numérico involucra un enfoque organizado para la recolección y el examen de información. En muchas ocasiones, las deducciones de experimentos diseñados numéricamente son evidentes sin necesitar un estudio numérico exhaustivo. (Dieter & Schmidt, 2009).

Los exámenes de repetitividad y reproducción (R&R) procuran descubrir cuánto de la diversidad detectada, vista como diversidad del procedimiento, se asigna a la diversidad del sistema de evaluación. Estos estudios se llevan a cabo de manera Cruzada (donde cada componente es valorado repetidamente por el mismo operador.) o Anidada (cuando cada componente es evaluado por un único operador, tal como ocurre en ensayos destructivos). Para evaluar la repetibilidad y la reproducibilidad, se utilizan dos métodos: el Método de cartas X-R y el Método de ANOVA. (Hernández & Reyes, 2017).

Resumiendo, la fundamentación de ANOVA radica en la construcción de un par de cálculos autónomos de la dispersión de la población común, σ^2 . Un cálculo de σ^2 se origina a partir de la disparidad entre las medias de las muestras, mientras que el otro cálculo se fundamenta en la disparidad de los datos en cada muestra. Al confrontar estos dos cálculos de σ^2 , podemos establecer si los promedios de la población son iguales. (Anderson, Sweeney, & Williams, 2008).

El indicador de centralidad más frecuentemente empleada es la media. Existen varios tipos de medias, como el cálculo, la ponderación, morfométrica y consistente. Cuando se denomina simplemente como "media" sin un adjetivo específico, suele referirse a la media aritmética.

La cifra aritmética, también reconocida como media, se adquiere al agregar la totalidad de los valores en un grupo de información y dividir dicha suma por la cantidad de elementos en ese conjunto. Esta medida proporciona un valor central que refleja el "punto medio" de los datos, ya que se distribuye equitativamente entre todas las observaciones. (Manikandan, 2018).

El promedio de un conjunto de observaciones se expresa como:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

La forma más directa de cuantificar la variabilidad dentro de una muestra es mediante el intervalo, que se describe como la brecha entre el punto más alto y bajo en la muestra. (Devore, 2012).

La variabilidad, que indica cómo los datos se dispersan alrededor de la media en una muestra, se cuantifica a través de la varianza. La dispersión es un indicador numérico que refleja la magnitud de las diferencias individuales la divergencia entre cada dato y la media del grupo:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2$$

(Havbro, 2012).

La desviación estándar de la muestra, representada por s , es la raíz cuadrada positiva de la varianza:

$$s = \sqrt{s^2}$$

La suma de los cuadrados de los errores (SSE por sus siglas en inglés) se define como:

$$SSE = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

(Devore, 2012)

2.2. Contenido de Humedad del Suelo

La relación entre el peso de agua contenido en una muestra en su estado natural y el peso de la muestra después de ser sometida a un proceso de secado en un horno a una temperatura entre los 105°-110° C se denomina contenido de humedad. Esta relación se comunica en porcentajes y puede cambiar desde cero si la muestra está totalmente desprovista de humedad hasta un límite máximo específico que no obligatoriamente llega al 100%. La cantidad de humedad en el suelo es una característica crucial que influye significativamente en su comportamiento, incluyendo alteraciones de tamaño, unión y fuerza física. (Scribd, 2018).

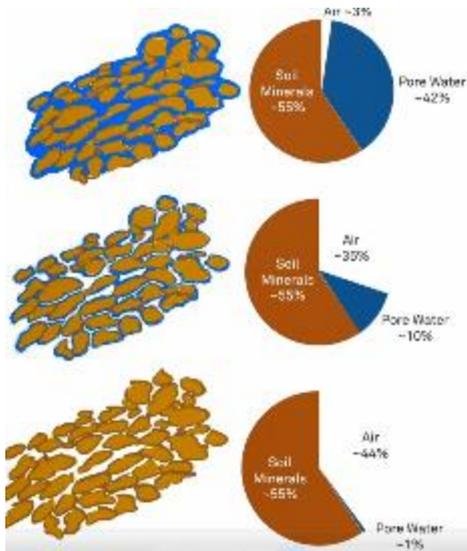
El contenido de líquido en el terreno se presenta como la proporción entre la cantidad de líquido presente en una muestra de terreno y la cantidad seca de esa misma muestra de terreno, o en relación con el tamaño inicial de la muestra. Estas dos maneras de expresar están vinculadas de forma lineal a través de un factor conocido como la densidad aparente del terreno muestreado. (Puy, 2006).

2.2.1. Contenido volumétrico de humedad de un suelo

El agua en el suelo puede representarse como la cantidad porcentual en unidades de volumen en que está presente por cada unidad de suelo. Esto se ilustra en el siguiente gráfico.

Figura 3

Representación esquemática de contenido volumétrico del agua en el suelo.



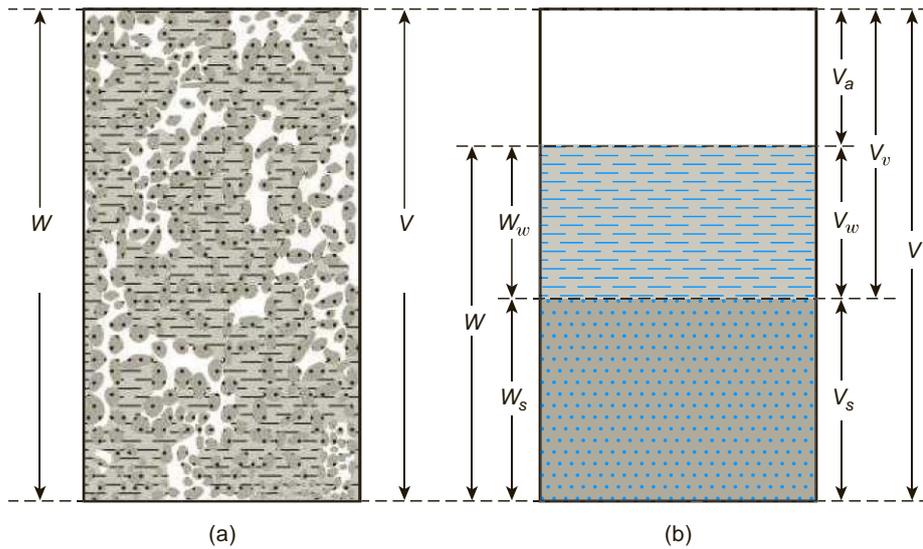
Nota. Fuente: Meter group.

2.3. Relaciones Gravimétricas y Volumétricas del Suelo

Para determinar las conexiones entre la masa y la capacidad, las tres etapas del terreno, a saber, elementos sólidos, líquido y gas, se segregan, como se ilustra en el gráfico.

Figura 4

(a) Elemento de suelo en estado natural; (b) tres fases del elemento de suelo.



Nota. Fuente: Das, 2010.

Basándonos en el concepto mencionado anteriormente, podemos derivar las siguientes relaciones tanto gravimétricas como volumétricas en los suelos:

Tabla 1

Relaciones gravimétricas y volumétricas en los suelos.

	Propiedades	Muestra Saturada ($W_s, W_w, G,$ conocidas)	Muestra no Saturada ($W_s, W_w, G, V,$ conocidas)	Formulas Suplementarias que Relacionan los Factores Medidos y Calculados				
VOLUMEN DE COMPONENTES	V_s Volumen de Sólidos	$\frac{W_s}{G\gamma_W}$	$V - (V_a + V_w)$	$V(1-n)$	$\frac{V_s}{1+e}$	$\frac{V_v}{e}$		
	V_w Volumen de Agua	$\frac{W_w}{\gamma_W}$	$V_v - V_a$	$S V_v$	$\frac{S V_e}{1+e}$	$S V_s e$		
	V_a Volumen de Aire o Gas	Cero	$V - (V_s + V_w)$	$V_v - V_w$	$(1-S)V_v$	$\frac{(1-S)V_e}{1+e}$	$(1-S)V_s e$	
	V_v Volumen de Vacíos	$\frac{W_w}{\gamma_W}$	$V - \frac{W_s}{G\gamma_W}$	$V - V_s$	$\frac{V_s n}{1-n}$	$\frac{V_e}{1+e}$	$V_s e$	
	V Volumen Total de la Muestra	$V_s + V_w$	Medida	$V_s + V_a + V_w$	$\frac{V_s}{1-n}$	$V_s(1-e)$	$\frac{V_v(1+e)}{e}$	
	n Porosidad	$\frac{V_v}{V}$		$1 - \frac{V_s}{V}$	$1 - \frac{W_s}{G V \gamma_W}$	$\frac{e}{1+e}$		
	e Relación de Vacíos	$\frac{V_v}{V_s}$		$\frac{V}{V_s} - 1$	$\frac{G V \gamma_W}{W_s} - 1$	$\frac{W_w}{W_s S}$	$\frac{n}{1-n}$	$\frac{wG}{S}$

Así mismo:

	Propiedades	Muestra Saturada (W_s , W_w , G , conocidas)	Muestra no Saturada (W_s , W_w , G , V , conocidas)	Formulas Suplementarias que Relacionan los Factores Medidos y Calculados		
PESOS PARA UNA MUESTRA ESPECIFICA	W_s Peso de Sólidos	Medida		$\frac{W_T}{1+w}$	$GV\gamma W(1-n)$	$\frac{W_w G}{eS}$
	W_w Peso del Agua	Medida		wW_s	$S\gamma W V_v$	$\frac{eW_s S}{1+e}$
	W_t Peso Total de la Muestra	$W_s + W_w$		$W_s(1+w)$		
PESOS PARA UNA MUESTRA DE VOLUMEN UNITARIO	YD Peso Unitario Seco	$\frac{W_s}{V_s + V_w}$	$\frac{W_s}{V}$	$\frac{W_t}{V(1+w)}$	$\frac{G\gamma W}{1+e}$	$\frac{G\gamma W}{1+wG/S}$
	YT Peso Unitario Húmedo	$\frac{W_s + W_w}{V_s + V_w}$	$\frac{W_s + W_w}{V}$	$\frac{W_T}{V}$	$\frac{(G+Se)\gamma W}{1+e}$	$\frac{(1+w)\gamma W}{w/S + 1/G}$
	$YSAT$ Peso Unitario Saturado	$\frac{W_s + W_w}{V_s + V_w}$	$\frac{W_s + V_v\gamma W}{V}$	$\frac{W_s}{V} + \left(\frac{e}{1+e}\right)\gamma W$	$\frac{(G+e)\gamma W}{1+e}$	$\frac{(1+w)\gamma W}{w + 1/G}$
	$YSUB$ Peso Unitario Sumergido	$YSAT - \gamma W$		$\frac{W_s}{V} + \left(\frac{e}{1+s}\right)\gamma W$	$\left(\frac{G+e}{1+e} - 1\right)\gamma W$	$\left(\frac{1-1/G}{w+1/G}\right)\gamma W$
RELACIONES COMENIDADAS	w Contenido de Humedad	$\frac{W_w}{W_s}$		$\frac{W_t}{W_s} - 1$	$\frac{Se}{G}$	$S\left(\frac{YD}{\gamma W} - \frac{1}{G}\right)\gamma W$
	S Grado de Saturación	1.00	$\frac{V_w}{V_v}$	$\frac{W_w}{V_v\gamma W}$	$\frac{wG}{e}$	$\frac{w}{\left(\frac{\gamma W}{YD} - \frac{1}{G}\right)}$
	G Gravedad Especifica	$\frac{W_s}{V_s\gamma W}$		$\frac{Se}{w}$		

Nota. Fuente: (NAVFAC DM 7.01).

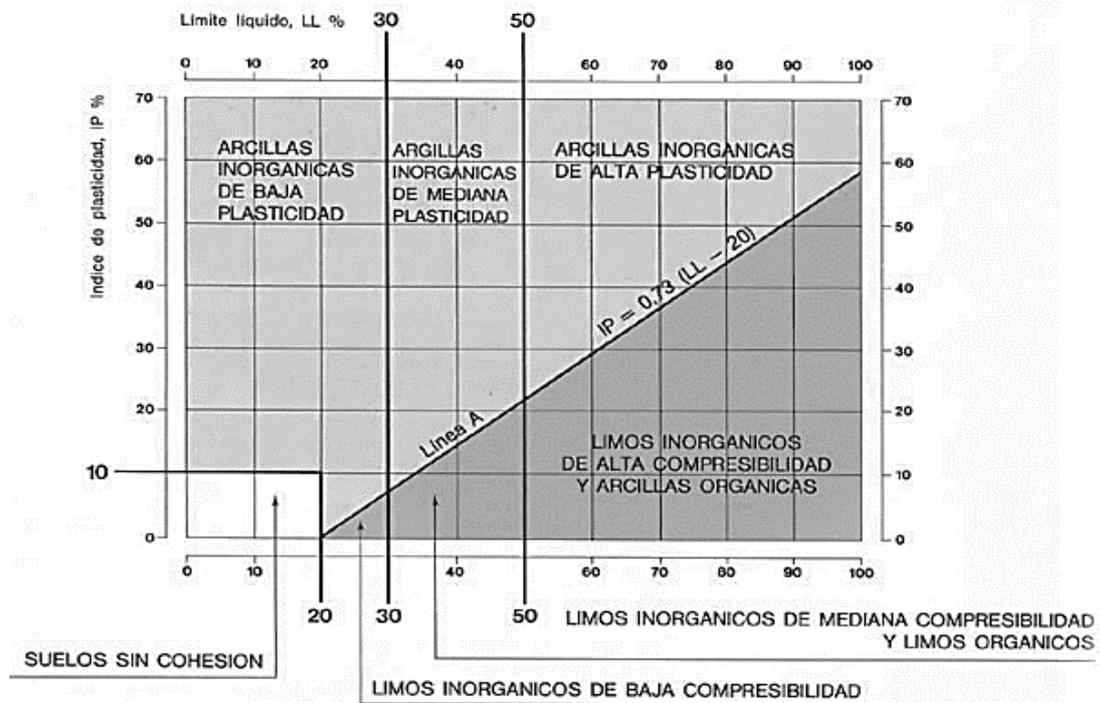
2.3.1. Límites de consistencia en suelos

Diversos niveles de contenido de humedad en un suelo influyen en sus distintas consistencias, modificando su comportamiento. Estos niveles indican una propiedad esencial para la clasificación de materiales cohesivos y desempeñan un papel determinante en su comportamiento. Estos niveles se establecen a través de los denominados límite líquido y límite plástico, comúnmente conocidos como los Límites de Atterberg. (Construmática, 2018).

La influencia del contenido de humedad en los suelos cohesivos ha dado lugar a la denominada carta de plasticidad, misma que se muestra a continuación.

Figura 5

(a) *Plasticidad de los suelos cohesivos y de grano fino.*

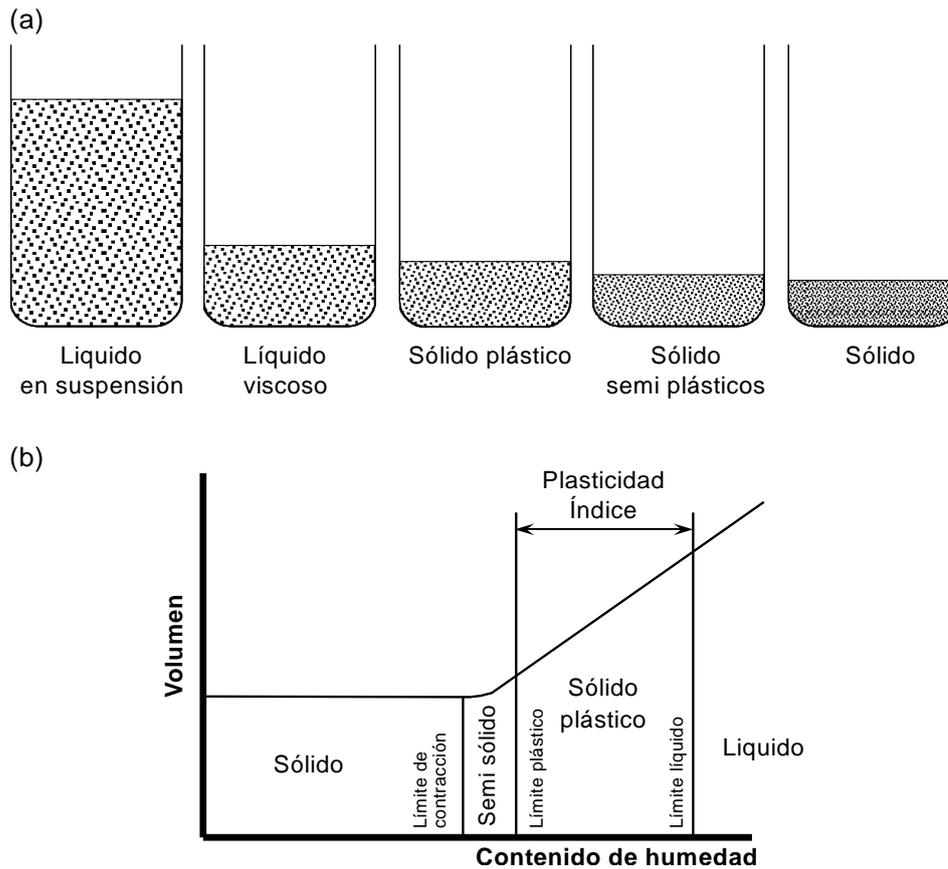


Nota. Fuente: (FAO, 2018).

Así mismo, para los suelos cohesivos se han definido los contenidos de humedad denominados límites de consistencia o límites de Atterberg, esta conceptualización se aprecia en la siguiente figura.

Figura 6

Idealización de la suspensión de partículas del suelo respecto de sus límites de consistencia



Nota. Fuente: (Carter & Bentley, 2016)

2.3.2. Contenido de humedad en suelos granulares

El término "índice de compacidad" se utiliza para narrar la compacidad in situ o soltura de un terreno granular. Sus cifras varían desde el mínimo de cero, que señala un terreno muy disperso, hasta el máximo de uno, que es indicativo de un terreno muy compacto. Aplicando la definición de peso unitario seco (con 0% de contenido de humedad), podemos expresar el índice de compacidad en relación con los pesos unitarios secos máximos y mínimos concebibles. (Das, 2015).

La densidad relativa en suelos granulares proporciona información crucial sobre la compacidad y la solidez del suelo. Es un indicador importante para evaluar la calidad y la capacidad de carga del suelo en la construcción y diseño de cimentaciones. La relación entre la densidad real y la densidad máxima posible revela la eficacia con la que se ha compactado el suelo durante el proceso de construcción. Un suelo con alta densidad relativa tiende a tener mejores propiedades de ingeniería, como mayor resistencia y estabilidad, lo que es esencial para asegurar la integridad de las

estructuras construidas sobre él. Por lo tanto, monitorear y ajustar la densidad relativa durante el proceso de construcción es una práctica fundamental en la ingeniería geotécnica. (Carter & Bentley, 2016).

En suelos saturados, la porosidad del suelo está totalmente ocupada por agua. Entonces, un aumento en la permeabilidad del terreno conduce a un aumento en el espacio ocupado por el líquido en el suelo. Este aumento en la capacidad de retención de agua da como resultado un aumento en la constante dieléctrica del terreno. (Rasch, 2011).

2.4. Ensayos en Laboratorio del Contenido de Humedad

2.4.1. Agua de constitución

El agua de constitución es el agua que se encuentra en los minerales del suelo y que se libera cuando se calienta el suelo. Esta agua es diferente del agua higroscópica, que es la que se encuentra en la capa externa de los minerales del suelo. y que se adhiere a ellos debido a la humedad del aire. En términos geotécnicos, el agua de constitución es importante porque puede afectar la resistencia y la estabilidad del suelo. Cuando se calienta el suelo, el agua de constitución se libera y puede causar cambios en la estructura del suelo, lo que puede afectar la capacidad del suelo para soportar cargas.

2.4.2. Agua de adsorbida

El agua adsorbida en un suelo es aquella que se encuentra adherida a las partículas sólidas del suelo por fuerzas electrostáticas y de Van der Waals. Esta agua no se encuentra en los poros del suelo, sino que se encuentra en la superficie de las partículas del suelo. La cantidad de agua adsorbida en un suelo depende de la textura del suelo, la materia orgánica presente y el pH del suelo. La cantidad de agua adsorbida en un suelo es mayor en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y alta materia orgánica.

El agua contenida en un suelo se divide en dos categorías: agua higroscópica y agua capilar. El agua higroscópica constituye la parte del agua adsorbida que está en la base de los componentes del suelo, adhiriéndose a ellas mediante fuerzas de Van der Waals. Por otro lado, la humectación capilar es la fracción acuosa adsorbida que se encuentra en los microporos del suelo y que se retiene en el suelo gracias a las fuerzas relacionadas con la fuerza de cohesión en la superficie del agua.

En resumen, el agua adsorbida en un suelo es aquella que se encuentra adherida a las partículas sólidas del suelo por fuerzas electrostáticas y de Van der Waals. La cantidad de agua adsorbida en un suelo depende de la textura del suelo, la materia orgánica presente y el pH del suelo. El agua adsorbida en un suelo se divide en dos tipos: agua higroscópica y agua capilar.

En este sentido, la presente investigación trata con el agua adsorbida, el agua capilar y el agua libre del suelo para poder desarrollar su propuesta.

2.4.3. Métodos gravimétricos

La única metodología directa para evaluar la humedad del suelo es la técnica gravimétrica. Este procedimiento incluye la extracción de una muestra de suelo, su pesaje antes y después del proceso de deshidratación, y posteriormente, la determinación del contenido de humedad. La muestra se considera completamente desprovista de humedad cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105 °C. Se han diseñado diversos tipos de equipos de recolección de muestras, así como hornos de desecado y balanzas especializadas, con el fin de llevar a cabo este método.

La técnica basada en la gravedad se distingue por ser la alternativa más precisa al momento de cuantificar la humedad presente en el suelo, y se convierte en algo indispensable para ajustar los dispositivos empleados en otras metodologías. A pesar de esto, su utilización para obtener una serie continua de datos sobre la humedad del suelo en un lugar particular encuentra restricciones, dado que requiere extraer muestras del suelo con el fin de estudiarlo. (Ideam, 2018).

2.4.4. Métodos volumétricos

De permitividad

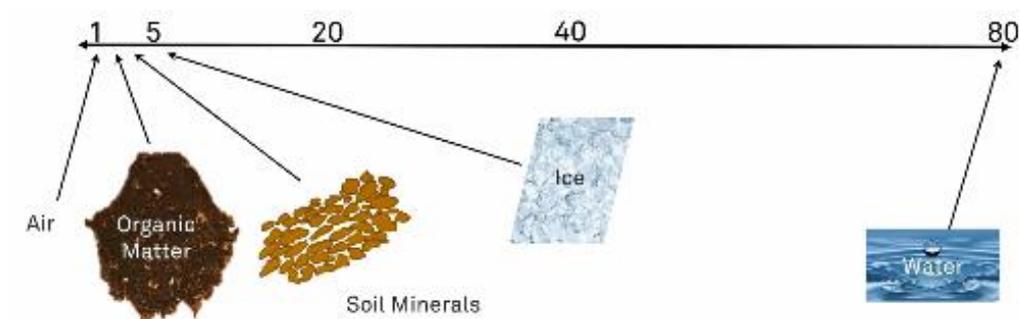
La susceptibilidad eléctrica es una propiedad que refleja la capacidad de un material para polarizarse cuando se expone a un campo eléctrico. Es esencialmente una medida de la resistencia del material al campo eléctrico externo, expresada como un número. La susceptibilidad eléctrica, un coeficiente adimensional, representa este fenómeno en relación con la permitividad eléctrica del vacío. Es importante destacar que el agua exhibe una permitividad relativa notablemente alta, alrededor de 80, siendo la más elevada entre todos los materiales. A modo de comparación, la permitividad relativa del aire es aproximadamente 1. (Casafont, 2017).

De conductividad eléctrica

La evaluación teórica y práctica ha revelado que la duración de tránsito o la rapidez de expansión del impulso electromagnético están directamente ligadas al valor de la constante dieléctrica aparente del suelo. De manera similar, la manifestación de disipación o amortiguación guarda una relación proporcional con la capacidad eléctrica de conducción de la masa del suelo. En consecuencia, ambos factores (velocidad y atenuación) muestran una conexión significativa con el contenido de humedad y la conductividad eléctrica del entorno, y por ende, con la salinidad del agua presente en el suelo. (Flores & Alcalá, 2010).

Figura 7

Idealización de la constante dieléctrica del suelo



Nota. Fuente: Meter Group.

De conductividad térmica

Las propiedades caloríficas del suelo, como la capacidad térmica, la especificidad térmica, la conductividad térmica y la difusividad térmica, sufren cambios en función del nivel de humedad, la granulometría y la estructura del suelo. Estas propiedades están asociadas a la actividad de microorganismos, el proceso de cambio mineralógico y la descomposición de residuos orgánicos. (Porta et al., 1994). (Montenegro y Malagón, 1990).

La capacidad del terreno para transferir energía mediante conducción molecular, representada como eficiencia térmica (λ), se describe como la cantidad de energía que fluye a través de una placa de terreno con área y grosor unitarios, con una variación de 1°C entre las dos caras (Honorato, 2000). Cuando la eficiencia térmica de un terreno es elevada, las variaciones de temperatura en la superficie son mínimas. La eficiencia térmica aumenta con el contenido de humedad, lo cual afecta a las alteraciones de temperatura en el terreno; no obstante, no experimenta un incremento

proporcional durante la saturación de poros. Se considera que la eficiencia térmica es una propiedad propensa a las modificaciones que acontecen en el terreno. (Honorato, 2000; Jury et al., 1991) (Rojas, Zúñiga, Sánchez de Prager, Pérez, & Gascó, 2007).

Las estrategias que se apoyan en impulsos de energía se basan en administrar una ráfaga de energía al terreno, generando un cambio en la temperatura que se registra mediante uno o varios sensores (Bristow et al., 1994). La velocidad de propagación térmica radial está influenciada por la densidad aparente del terreno, la mineralogía, la configuración de las partículas y, principalmente, por la cantidad de agua presente en el suelo (Jury y Horton, 2004). Aquellas tácticas de impulsos térmicos que hacen uso de observaciones térmicas con un único sensor cerca de la fuente de calor son denominadas tácticas de dispositivos particulares de medición. (Shiozawa y Campbell, 1990; Bristow et al., 1994). Por otro lado, se denominan métodos de múltiples sondas a aquellos donde se realizan observaciones caloríficas con más de un sensor en las cercanías de la fuente de energía (Larson, 1988; Campbell et al., 1991; Bristow et al., 1993, 1994; Heitman et al., 2003; Ren et al., 2003, 2005). En ambos enfoques, las características caloríficas del suelo se establecen a partir de la respuesta del suelo a las ráfagas de energía, resolviendo la ecuación radial de conducción térmica (Carslaw y Jaeger, 1959; Jury y Horton, 2004). Estos métodos suponen la aplicación de una ráfaga de energía con duración mediante la fuente de longitud infinita en un entorno uniforme y isotrópico que, en un principio, se halla a una temperatura particular. (Serna, 2015).

De impedancia acústica

Los materiales porosos absorben el sonido porque tienen muchos poros. El sonido entra en los poros y se divide en muchas ondas más pequeñas. Estas ondas se mueven más lentamente y se pierden por la fricción con el aire y las fibras del material. Gerges, citado por (Torres, 2010).

Las ondas sonoras son causadas por la vibración de las partículas de un medio. Cuando estas partículas vibran, transmiten su energía a las partículas vecinas. Esta energía se propaga a través del medio en forma de ondas. La velocidad de propagación de las ondas sonoras depende de las propiedades del medio. En general, las ondas sonoras se propagan más rápido en los sólidos que en los líquidos y en los gases. Cuando las ondas sonoras encuentran un límite entre dos medios, se pueden reflejar o transmitir. La dirección de la reflexión o la transmisión depende de las propiedades de los dos medios y de la dirección de la onda incidente. Este principio físico se utiliza

para detectar fallas en los materiales. Cuando una onda sonora encuentra una falla, se refleja en una dirección diferente. Esto permite a los ingenieros detectar la ubicación y el tamaño de la falla.

Las vibraciones mecánicas de alta frecuencia, conocidas como ondas ultrasónicas, se desplazan mediante los dispositivos. Estas ondas tienen longitudes de onda cortas, lo que las hace ideales para inspeccionar el interior de las piezas. Para generar ondas ultrasónicas, se utilizan transductores piezoeléctricos. Los transductores piezoeléctricos son materiales que transforman la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Cuando se aplica un pulso de energía eléctrica al transductor, este vibra y emite una onda ultrasónica. La onda ultrasónica se propaga a través del material de ensayo y es recibida por otro transductor piezoeléctrico. El transductor receptor convierte la energía acústica en energía eléctrica, que se amplifica y se procesa para obtener información sobre el material. Para que los transductores funcionen correctamente, deben estar acústicamente acoplados con el material de ensayo. Esto significa que deben estar en contacto directo con el material de ensayo para que las ondas ultrasónicas puedan propagarse a través de él. (Santos et al., 2005) citado por (Quil, 2009).

De absorción de neutrones

Las partículas de gran energía desprendidas por la fuente experimentan una reducción en su velocidad mediante muchos impactos con los núcleos atómicos presentes en el suelo, un procedimiento conocido como dispersión y termalización, o pueden ser capturadas por estos núcleos. Un pequeño porcentaje de las partículas dispersadas retrocede hacia el detector, y entre estas, una proporción aún más ínfima logra disminuir su velocidad a niveles de energía térmica (equivalentes a la temperatura ambiente) y, por lo tanto, pueden ser registradas. Los elementos más comunes en el suelo, como el aluminio y el silicio, dispersan partículas con una pérdida mínima de energía debido a su masa considerable en comparación con una partícula. Sin embargo, cuando una partícula colisiona con un núcleo de hidrógeno, su energía se reduce a la mitad en promedio, ya que la masa del núcleo de hidrógeno es idéntica a la de la partícula.

En las escalas temporales generalmente empleadas en la investigación y gestión del riego, las alteraciones en el contenido de carbono y nitrógeno del terreno son insignificantes y ejercen escaso impacto en la cantidad de neutrones térmicos. En

contraste, las variaciones en el contenido de hidrógeno y oxígeno en el terreno se atribuyen principalmente a cambios en la proporción de agua en el suelo. Por ende, la cantidad de neutrones térmicos se ve considerablemente influenciada por las modificaciones en el contenido de agua; y la proporción de agua volumétrica puede vincularse de manera exacta y precisa con la medición de neutrones térmicos a través de la calibración empírica. La densidad del terreno tiene un impacto pequeño pero mensurable en la cantidad de neutrones térmicos alrededor del sensor. Este efecto es lo suficientemente pequeño, pero puede ser medido con precisión. (IAEA, 2008).

2.4.5. Métodos tensiométricos

De potencial mátrico

El tensiómetro ha sido uno de los instrumentos más antiguos y ampliamente empleados a nivel mundial para la programación del riego. Su aplicación registrar la capacidad hidráulica del terreno tiene una historia documentada desde los primeros años del anterior siglo (Livingston, 1908; Gardner et al., 1922; Richards, 1928; O, 2001), y su empleo en el riego de cosechas data de finales de la década de 1950 (Richards y Marsh, 1961; Smajstrla y otros, 1998). A lo largo del tiempo, han surgido varias adaptaciones en cuanto a diámetro, longitud, capacidad de percepción de presión y niveles de automatización (ver figura 8.1). En años recientes, se han utilizado dispositivos con solenoides y transductores para supervisar sistemas de riego. Es relevante señalar que los tensiómetros no miden de manera directa el contenido de agua del terreno; en lugar de ello, registran la expresión combinada de los potenciales matriciales y gravitacionales en el entorno. (IAEA, 2008).

Osmótico y de potencial gravitacional

La energía potencial del agua en el terreno se establece como el potencial de agua del suelo e incluye el potencial gravitacional, el potencial de presión y el potencial osmótico. Comúnmente, se asume que la mezcla de agua y terreno es uniforme a nivel local, lo que hace que el potencial osmótico sea irrelevante. La energía gravitacional indica la fuerza requerida para levantar el agua desde una ubicación particular en el terreno hasta una elevación de comparación, comúnmente la superficie del suelo. Puesto que se puede computar la energía gravitacional, la evaluación del potencial del terreno se centra en determinar su potencial de presión. Existen diversos métodos, ya sean directos o indirectos, para medir este potencial de presión. (Ideam, 2018).

2.5. Ensayos en Campo del Contenido de Humedad

2.5.1. Gravimétrico

La técnica gravimétrica incluye la obtención de una muestra de terreno, determinando su peso antes y después del proceso de deshidratación, y luego calcular la proporción original de humedad. Aunque es el procedimiento más antiguo, sigue siendo el más aplicado para obtener datos sobre la humedad del terreno. Dado que constituye la única manera directa de medir la humedad del suelo, se vuelve esencial para ajustar los dispositivos utilizados en otras metodologías. La obtención de muestras puede realizarse mediante el uso de barrenos o tubos de muestreo.

2.5.2. Resistencia eléctrica

La base para medir la humedad del suelo mediante principios eléctricos fue inicialmente descrita por Whitney y colaboradores (B, 1897). No obstante, transcurrieron varios años antes de que Bouyoucos y Mick (B, 1940a), Colman (B, 1946), Bouyoucos (B, 1949), y Youker y Dreibelbis (B, 1951) logaran desarrollar unidades eléctricas que resultaran realmente efectivas.

Los dispositivos de "bloques" de la corriente eléctrica en estos dispositivos diseñados por los autores previamente nombrados funciona en base al principio fundamental de que la resistencia al paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos insertados en el suelo está directamente vinculada al contenido de humedad del suelo circundante. Este mecanismo se aprovecha para medir los cambios en la resistencia eléctrica, los cuales son detectados mediante un medidor ubicado en la superficie del suelo. La lectura de la oposición en el instrumento se transforma en cantidades numéricas de humedad mediante una tabla de calibración.

La exactitud informada por los fabricantes de sensores de humedad del suelo alcanza, en el mejor de los casos, el 1 por ciento en peso (Meter Group, 2019). Todos los tipos de bloques exhiben una respuesta similar ante cambios en la humedad del suelo. Por lo general, se considera que los bloques de humedad y suelo son más confiables en el rango de bajos niveles de humedad, es decir, por debajo de la capacidad de campo. A medida que los niveles de humedad aumentan, el cambio en la resistencia por unidad de variación en el contenido de humedad se reduce, disminuyendo así la sensibilidad de los sensores. No obstante, algunas discrepancias

aparentes en los niveles más altos de humedad pueden también estar relacionadas con la pérdida de agua libre durante el muestreo durante el proceso de calibración.

2.5.3. Difusión de calor

La base teórica elemental de dispositivos térmicos de difusión fue presentada por Patten (C, 1909). La propuesta de un diseño de celda específico fue sugerida por Shaw y Baver (C, 1939a). Diversas modificaciones al diseño propuesto por Shaw y Baver fueron probadas por Kersten (C, 1948), Momin (C, 1947) y Aldous, Lawton y Mainfort (C, 1952).

El principio subyacente en la técnica de dispersión térmica radica en la variación de la propagación calórica del suelo en base a la cantidad de agua que contiene, se enciende una fuente de calor eléctrica que está colocada en el suelo, generando un aumento de temperatura que se mide mediante un dispositivo de temperatura sensible. Este aumento de temperatura se correlaciona con la humedad existente. En el caso de suelo húmedo, el calor se disipa alejado de la fuente térmica en el detector, lo que resulta en un incremento de temperatura menor en comparación con el suelo seco.

Las aplicaciones de Celdas de dispersión térmica han evidenciado que los detectores tienen la capacidad de percibir alteraciones mínimas. No obstante, su rendimiento resulta poco satisfactorio cuando se emplean en terrenos con niveles de humedad que superan la capacidad de campo. En suelos con elevada contracción, la falta de conexión estrecha entre el detector y el terreno se manifiesta a medida que disminuye el contenido de humedad, originando resultados poco fiables hasta alcanzar el umbral de contracción. En contraste, los detectores de conducción térmica han mostrado ser más efectivos.

Los instrumentos de difusión de calor necesitan ser calibrados para adaptarse a diversas composiciones de suelos y densidades. A pesar de esto, se observó en el estudio de Shaw y Baver en 1939 que las concentraciones de sal en un rango de 100 a 10,000 ppm no tuvieron impacto en las lecturas del dispositivo.

2.5.4. Absorción

Livingston y Koketsu (D, 1920) concebieron aparatos permeables que, al ser implantados en el terreno, absorberían la humedad de la zona adyacente. La evaluación de la humedad del suelo se derivaría luego de la alteración en el peso de estos puntos.

Wilson (D, 1927) y Stoeckeler (D, 1937) llevaron a cabo investigaciones adicionales sobre la utilización de dispositivos de absorción. Davis y Slater (D, 1942) utilizaron un dispositivo de absorción compuesto por una cámara permeable que albergaba un tapón ajustado, el cual podía retirarse para su pesaje. Esta solución superaba las restricciones vinculadas con la necesidad de retirar el instrumento cada vez que se pesaban los dispositivos. Dimbleby (1954) ideó un bloque de absorción tipo lápiz diseñado para ser insertado en el terreno, y los niveles de humedad se evaluaban a través de los cambios de color del "lápiz". No obstante, este procedimiento es más cualitativo que cuantitativo y se le atribuye un error inherente, razón por la cual nunca ha sido ampliamente utilizado.

2.5.5. Tensiométrico

Un tensiómetro comprende una copa porosa, comúnmente de cerámica, que está conectada a un dispositivo de medición de presión a través de un tubo. El sistema se llena con agua, y el agua en la copa alcanza un equilibrio con la humedad en el suelo circundante. Conforme el terreno pierde humedad, el agua se desplaza fuera del recipiente, generando una tensión mayor, o retorna al recipiente a medida que el suelo se humedece y experimenta una tensión menor. Estas alteraciones en la presión se visualizan en un instrumento de medida, comúnmente un vacuómetro con tubo de Bourdon o un manómetro de mercurio. Para mantener un seguimiento ininterrumpido de las variaciones de tensión, el tensiómetro también puede conectarse a un dispositivo registrador de presión (Richards y Gardner, E, 1936) o a un sensor de presión eléctrico. L. A. Richards (E, 1954) desarrolló varios tensiómetros que permiten obtener datos de tensión a diversas profundidades utilizando una sola sonda.

Los tensiómetros resultan más efectivos al medir el contenido de humedad en tensiones inferiores a casi 0.9 atmósferas, que, en términos generales, corresponden a un rango de humedad desde la capacidad de campo hasta justo por debajo de la saturación. En terrenos más secos, donde las tensiones son más elevadas, los tensiómetros se vuelven ineficaces ya que el aire puede penetrar al sistema a través del punto poroso. Para calcular el contenido de humedad con un tensiómetro, es preciso estar familiarizado con la relación entre la tensión de humedad y el contenido de humedad. Esta relación puede ser establecida en el laboratorio a través de una curva de humedad-tensión creada mediante un dispositivo de membrana permeable o placa porosa, o recolectando muestras de terreno alrededor de un tensiómetro e

interrelacionando el contenido de humedad de las muestras con las mediciones simultáneas del tensiómetro.

L. A. Richards (E, 1949) Subrayó que los dispositivos de medida de vacío comúnmente presentan una exactitud en el rango del 2 por ciento, mientras que el barómetro de mercurio es aún más exacto.

La temperatura ejerce una influencia sobre la precisión de los tensiómetros. Las diferencias de Calor entre el lugar poroso del detector de tensión y el sustrato puede generar alteraciones en las mediciones de tensión.

La existencia de sal en el terreno o en el líquido intersticial parece tener un impacto menor en los enfoques que se apoyan en detectores de tensión en comparación con los métodos eléctricos. S. J. Richards (E, 1938) indicó que los detectores de tensión presentan un marcado efecto de historial; tienden a indicar una tensión de humedad del terreno más elevada durante el proceso de deshidratación en comparación con el proceso de hidratación. En 1949, L. A. Richards notó que este fenómeno no se percibe como una desventaja considerable dado que el ciclo de hidratación suele ser bastante breve en relación con el ciclo de deshidratación. No obstante, Ewart y Baver (B, 1950) comunicaron una desventaja sustancial relacionada con la demora en la respuesta a las alteraciones en el contenido de humedad del terreno. Los detectores de tensión han exhibido retrasos que varían desde aproximadamente media hora hasta varias horas para reflejar cambios en la tensión causados por modificaciones en la humedad del terreno.

El detector de tensión quizás sea el más fácil de ubicar y el más veloz de entender entre todos los aparatos para evaluar la humedad del terreno. Sin embargo, en el presente, los detectores de tensión no son idóneos para su colocación a hendiduras que superen los 20 pies.

Un ejemplo de aparato tensional para evaluar la humedad es el evaluador Speedy, un sistema móvil que consiste de un envase equipado con un manómetro de presión integrado, una balanza y un estuche de traslado. Se selecciona una pequeña muestra del material, se mide y se coloca en el envase. Luego, se agrega un reactivo y se cierra herméticamente el envase, agitándolo para mezclar el reactivo con la muestra. La humedad libre presente en la muestra reacciona con el reactivo, provocando un

aumento de gas y presión en el envase que es proporcional a la cantidad de humedad. El valor del contenido de humedad se observa directamente desde el manómetro calibrado. (Protimeter, 2014).

El ensayo Speedy

Para llevar a cabo la medida de lo que contiene la humedad en el suelo, es esencial utilizar un dispositivo conocido como "Speedy". Este equipo incluye un recipiente tubular de presión conectado a un manómetro, una balanza, carburo de calcio, un medidor de carburo de calcio, esferas de acero con un diámetro de 1 centímetro y el equipo necesario para la limpieza. La operación de este aparato se rige por las normas ASTM D 4944-04 y AASHTO T-217.

Figura 8

Speedy 2000 Determinador de humedad



Nota. Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012

El Speedy es un dispositivo empleado para realizar mediciones de contenido de humedad en el terreno, ya que transportar muestras de suelo al laboratorio para llevar a cabo este análisis no resulta práctico y, de hecho, es complicado. Para llevar a cabo este ensayo, es necesario que todas las partículas sometidas al análisis atraviesen el tamiz No. 4 (4,75 milímetros).

La dificultad con esta prueba radica en que pueden surgir imprecisiones dado que la muestra empleada en el dispositivo es demasiado reducida para reflejar con precisión la humedad en toda la extensión del área. Por lo tanto, se sugieren otros métodos cuando se necesitan datos extremadamente precisos.

Calibración

Calibrar el equipo representa un paso crucial en la implementación de cualquier prueba, ya que se asegura de proporcionar al dispositivo la capacidad de generar datos precisos. Por esta razón, se presentan los elementos esenciales para llevar a cabo la calibración del equipo utilizado en esta prueba,

2.5.6. Penetrométricos

La aproximación al contenido de humedad se puede conseguir al relacionarlo con la potencia necesaria para impulsar un dispositivo mediante el terreno. Allyn y Work (F, 1941a) concibieron un aparato al que llamaron "availmetro", el cual evaluó la potencia solicitada para orientar dos agujas en dirección a un centro de suelo. Allyn (F, 1942) introdujo un dispositivo para explorar el suelo recién creado que proporcionó una aproximación de la cantidad de humedad con una precisión del 0.5 por ciento. Diversos investigadores, particularmente en los Países Bajos, han generado dispositivos para evaluar la fuerza de la introducción (Hvorslev, F, 1949). Es importante destacar que el equipo de penetración debe ser ajustado para cada tipo de suelo con el objetivo de establecer la conexión entre la resistencia a la penetración y el contenido de humedad. Aunque el procedimiento es muy rápido, enfrenta complicaciones al ser empleado en suelos que tienen presencia de piedras o grava.

2.5.7. Radioactivos

Belcher, Cuykendall y Sack (G, 1950) al parecer han presentado la técnica radiactiva para la medición de la humedad del sustrato en 1950. Este enfoque se basa en la concepción de cuantificar la disminución de la rapidez de los neutrones emitidos hacia el sustrato mediante una fuente de neutrones veloz. La disminución de energía es notablemente superior cuando los neutrones colisionan con átomos de bajo peso atómico y es directamente proporcional al número de átomos existentes en el sustrato. La consecuencia de estas colisiones implica transformar un neutrón veloz en un neutrón lento. El hidrógeno, elemento principal de bajo peso atómico presente en el sustrato, está en gran medida contenido en las moléculas de agua del sustrato. El recuento de neutrones lentos registrado por un tubo de detección, tras la emisión de neutrones rápidos desde una fuente radioactiva, se exhibe electrónicamente en un dispositivo de escala.

La técnica radiactiva suministra datos sobre la cantidad de líquido por cada unidad cúbica de terreno. Para calcular el porcentaje de contenido hídrico en peso, es

esencial determinar la compacidad desprovista de líquido del terreno. De acuerdo con el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (G, 1955h), el espacio ocupado por el terreno evaluado mediante esta metodología adopta la configuración de un bulbo con una extensión que varía entre 6 y 15 pulgadas, dependiendo de la proporción de humedad y la densidad del terreno.

La mayor parte de los estudios han señalado una precisión que oscila entre el 1 y el 2 por ciento por volumen. No obstante, para lograr esta exactitud, se sugiere realizar la calibración de la sonda específicamente en el tipo de suelo que se va a analizar y con la carcasa específica que se utilizará al descender la sonda.

La existencia de sal en la humedad del terreno no impacta de manera significativa los datos adquiridos mediante la técnica radiactiva. A pesar de que comúnmente se ha asumido que la temperatura no ejerce un efecto destacado en este método, hay algunas indicaciones de un posible impacto de la temperatura. Las mediciones cerca de la superficie se ven afectadas por la posición de la sonda en relación con la frontera entre el aire y el sustrato; cuando la sonda se encuentra más próxima a esta interfaz, se obtienen conteos inferiores a los típicos para un contenido de humedad específico a mayor profundidad. Para reducir al mínimo los errores de sincronización, se aconseja emplear un intervalo de tiempo estándar de 2 minutos. Es esencial mantener los tubos de acceso libres de exceso de humedad, ya que esto podría resultar en lecturas incorrectas. Se debe tener en cuenta que el tipo y tamaño de la carcasa, así como el método de instalación de los tubos de acceso, tienen un impacto significativo en las lecturas, y se deben generar nuevas curvas de calibración para cada tipo de instalación. La calibración puede llevarse a cabo mediante el muestreo gravimétrico en la zona circundante a un tubo de acceso, utilizando muestras voluminosas en el laboratorio y empleando soluciones de ácido bórico con diversas concentraciones. Es importante tener en cuenta que existe un riesgo radiactivo asociado con el uso de este equipo. La amenaza de exposición es proporcional a la distancia entre la fuente y el operador, así como al tiempo de exposición. Por lo tanto, la mayoría de los riesgos pueden reducirse mediante manejando apropiadamente el dispositivo.

La aplicación del método radiactivo implica un considerable consumo de tiempo, especialmente al considerar el tiempo necesario para llevar a cabo la calibración. El equipo es tanto pesado como delicado, lo que aumenta la probabilidad

de fallos. Se destina una cantidad significativa de tiempo a las labores de reparación, además de la recalibración necesaria después de la mayoría de las intervenciones de mantenimiento. La reparación del escalador puede necesitar la asistencia de un especialista en electrónica. (Johnson, 1992).

2.5.8. Marco Conceptual

Palabras Clave.

Diseño e implementación

El proceso de elaboración de un plan o plano para una estructura, sistema o producto se denomina diseño. El proceso de dar vida a ese plan desarrollando, probando e implantando el sistema o producto de acuerdo con las normas de diseño se conoce como implantación.

Equipo electrónico

Un artículo diseñado con una función determinada, como medir o registrar algo, se llama dispositivo electrónico. El aparato está equipado con chips de silicio o transistores que regulan y alteran la corriente eléctrica que circula por él.

Medición de la humedad de suelos

El método de medición de la humedad del suelo consiste en averiguar cuánta agua hay en el suelo. Es crucial tanto para la ingeniería geotécnica como para la agricultura, ya que ayuda a predecir catástrofes geológicas, a comprender los procesos hidrológicos y a mantener un suelo productivo y sano. La humedad del suelo también influye en sus cualidades técnicas, como la permeabilidad, la compresibilidad y la resistencia al corte. Para garantizar la estabilidad de las estructuras erigidas sobre el suelo y evitar desprendimientos, es crucial controlar el contenido de humedad del suelo.

Calibración

Es la confrontación de un instrumento con un estándar de medición de precisión conocida, con el propósito de identificar, informar o corregir, mediante ajustes, cualquier desviación en la precisión del dispositivo. (Hernández & Reyes, 2017).

Resistividad eléctrica

La oposición de un resistor elemental puede calcularse a través de la expresión $R = \rho L/A$, donde R denota la resistencia, L representa la longitud, A es el área de sección transversal, y ρ es la resistividad, una característica intrínseca del material. La resistividad es el recíproco de la conductividad σ , es decir, $\rho=1/\sigma$. En circunstancias equivalentes, una resistencia que tenga el doble de extensión presentará el doble de oposición, y una que posea el doble de área de sección transversal exhibirá la mitad de la resistencia. Además, un material con una resistividad superior dará como resultado una resistencia de manera proporcionalmente mayor. (Lucas, 2018).

Sensor

El componente reconocido como "detector" o "sensor" es aquel elemento que establece contacto directo con la magnitud que se desea evaluar. Al entrar en interacción con esta magnitud, experimenta modificaciones en sus características. Por ejemplo, si la magnitud física que se busca medir es la temperatura, la propiedad alterada podría ser la resistencia eléctrica, la cual cambia de manera proporcional a la variable medida. (Rodríguez, 2018).

2.6. Antecedentes de la Investigación

Estado Del Arte

Para la determinación de los precedentes de la presente exploración se han recurrido a las fuentes literarias disponibles en línea, se han hallado tres preámbulos internacionales directamente vinculados con el tópico objeto de la presente exploración; sin embargo, los preámbulos nacionales no parecen haber proporcionado la problemática de la presente exploración desde una perspectiva formal, de manera que, se mencionan preámbulos distantes a las bases teóricas de la tesis en curso.

2.6.1. Antecedentes Internacionales

Schwamback et al. (2023) nos dicen que en la agricultura de precisión se emplean con frecuencia sistemas automatizados de medición de la humedad del suelo. La precisión puede disminuir si se utilizan sensores de bajo costo, pero puede mejorarse la extensión espacial. En este estudio se comparan sensores de humedad del suelo de bajo costo y de gama alta para examinar la relación entre precio y precisión. El análisis se basa en pruebas de laboratorio y de campo del sensor capacitivo SKU:SEN0193. Además de la calibración individual, se sugieren dos procedimientos

de calibración simplificados: una calibración universal basada en los 63 sensores y una calibración de un solo punto que emplea la respuesta del sensor en suelo seco. Los sensores se pusieron en el campo y se conectaron a una estación de monitorización barata para la segunda ronda de pruebas.

Los sensores pueden seguir las variaciones diarias y estacionales de la humedad del suelo provocadas por la luz solar y las precipitaciones. Se utilizaron cinco factores para evaluar el rendimiento de los sensores de bajo costo frente al de los sensores comerciales: costo, precisión, necesidad de mano de obra cualificada, volumen de muestra y vida útil. Los sensores comerciales ofrecen datos puntuales de alta fiabilidad a un costo de adquisición elevado, mientras que los sensores de bajo costo pueden adquirirse en mayores cantidades por menos dinero, lo que permite realizar observaciones espaciales y temporales más profundas con una precisión media. El uso de sensores SKU se sugiere entonces para iniciativas rápidas con presupuestos reducidos cuando no es necesaria una gran precisión de los datos.

Marino et al. (2023) nos dicen que, en Campania, en el sur de Italia, las laderas empinadas cubiertas de depósitos piroclásticos sueltos y no saturados sufren con frecuencia deslizamientos de poca profundidad que se transforman rápidamente en flujos de escombros, causando importantes daños y un elevado número de víctimas mortales. Los días 15 y 16 de diciembre de 1999 se produjo un desprendimiento desastroso en la ladera de Cervinara, situada a unos 40 km al noreste de Nápoles. El deslizamiento fue causado por una tormenta que arrojó 325 mm de lluvia en 48 horas. Desde 2017, se han llevado a cabo operaciones de vigilancia hidrometeorológica cerca de la escarpa donde se produjo el deslizamiento de 1999 con el fin de evaluar el balance hídrico e identificar los procesos hidrológicos significativos que implican la cubierta y el sistema de aguas subterráneas poco profundas que se desarrollan en la parte superior del lecho rocoso fracturado de piedra caliza subyacente.

A partir del 1 de diciembre de 2022 se ha creado una red de bajo coste y acceso remoto para aumentar la vigilancia hidrológica sobre el terreno. Se ha probado para monitorizar la humedad del suelo de forma dispersa mediante una red de sensores capacitivos de bajo coste que se comunican a través del Internet de las Cosas (IoT). La red prototipo probada, que se comunica a través de un sistema de Internet de las Cosas basado en Wi-Fi que utiliza placas ESP32, permite realizar lecturas del contenido de agua del suelo en dos lugares distintos. La visualización remota de los datos de campo

se ha realizado utilizando la plataforma IoT ThingSpeak (TM). El prototipo de esta red de bajo coste basada en IoT tiene el potencial, según los resultados, de aumentar el volumen de datos hidrológicos, lo que la hace apropiada para establecer sistemas de alerta temprana en zonas propensas a deslizamientos.

En el instituto CTIS de la Universidad de Texas en el año 2014, (Sotelo, Mazari, Garibay, & Nazarian, 2014) Condujeron el estudio "Variabilidad de los Dispositivos de Medición de Contenido de Humedad en Suelos de Subrasante" en el Centro para Sistemas de Infraestructura de Transporte de la Universidad de Texas, ubicado en El Paso. Las principales conclusiones derivadas de la investigación son las siguientes:

El Probador de Humedad Speedy (PHS) demostró ser generalmente más certero y exacto que otros objetos en la evaluación del contenido de humedad de los materiales geotécnicos examinados. El artefacto reflectométrico de dominio temporal (RDT) se situó directamente detrás del PHS en términos de precisión en la evaluación del contenido de humedad, mientras que las sondas de densidad de suelo (SDS) presentaron algunas incertidumbres. No obstante, se observó que los resultados de las SDS podrían ser mejorados mediante una calibración más rigurosa, ya que el rendimiento del dispositivo parece depender del tipo de material. Tanto el PHS como el RDT mostraron menos del 5% de incertidumbre en diferentes tipos de suelos y niveles de humedad evaluados, mientras que la variabilidad de las SDS en la determinación del contenido de humedad en el suelo compactado fue de hasta el 8,5%. El PHS mostró una propensión a subestimar el contenido de humedad, la cual puede ser corregida mediante la calibración basada en las mediciones de humedad obtenidas en el horno.

La relevancia del estudio previo radica en que sirve como una pauta fundamental con el fin de diseñar la metodología y para establecer los objetivos del método experimental.

En el Royal Institute of Technology, Estocolmo, (Salour, 2015) Llevó a cabo el estudio "Influencia de la Humedad en el Comportamiento Estructural de Pavimentos" en el Departamento de Ciencias del Transporte del Real Instituto de Tecnología KTH. Las conclusiones principales obtenidas de la investigación son las siguientes:

En zonas frías, los factores climáticos tienen un efecto importante en las características mecánicas de los materiales no ligados, lo cual puede afectar el desempeño global de un terreno. El desgaste de la superficie vinculado al clima impone considerables demandas en términos de mantenimiento y rehabilitación, representando así un gasto significativo para las autoridades viales y el erario público. En el caso de los materiales no ligados utilizados en pavimentación, el contenido de humedad y la temperatura (especialmente temperaturas bajo cero) son los dos parámetros climáticos primordiales que afectan el comportamiento mecánico de las capas no ligadas. La relación entre los factores ambientales, su interacción con las estructuras de pavimentos y su impacto en el comportamiento de los materiales es extremadamente compleja. A pesar de la cantidad considerable de estudios realizados en los últimos años, aún falta una comprensión fundamental del comportamiento de los materiales y la formulación de modelos en relación con los impactos del medio ambiente.

Se llevan a cabo diversos estudios con el propósito de comprender el vínculo entre las tensiones y la humedad en dispositivos no cohesionados, y estos a menudo se realizan mediante análisis que podrían no representar completamente las circunstancias del entorno real. Con el fin de abordar este tema, en el estudio in situ en el área de pruebas de Torpsbruk, se implementaron dispositivos de medición para la humedad, temperatura y nivel freático. Se empleó un deflectómetro de caída de peso (FWD) con cargas de impacto multinivel para evaluar el comportamiento mecánico del pavimento. Durante un periodo de deshielo en primavera, se analizó el estado del pavimento y su comportamiento estructural. Asimismo, se llevó a cabo un estudio de caso en el que se alteró el nivel del agua subterránea en el área de pruebas mediante ajustes en el ciclo de drenaje.

A partir de las observaciones en terreno, que incluyeron variaciones durante la temporada de primavera-deshielo y ajustes en el nivel freático, así como de los análisis de laboratorio, se destacó que la presencia de humedad tiene un impacto significativo en la respuesta mecánica de los materiales no ligados y la subrasante. En términos generales, se notó que a medida que aumentaba el contenido de humedad, la rigidez de los materiales no ligados disminuía, al igual que su resistencia a la acumulación de deformación permanente. Los registros de campo obtenidos en la sección de pruebas instrumentadas en Torpsbruk indican la viabilidad y el potencial de emplear mediciones in situ para obtener una comprensión más completa de los efectos

estacionales ambientales en el rendimiento del pavimento. Aunque las investigaciones de campo y la instrumentación pueden presentar desafíos y costos, los resultados de tales estudios pueden ser sumamente valiosos y de gran interés para el desarrollo de modelos de respuesta, como los modelos de rigidez ante la humedad. Estas mediciones de campo pueden proporcionar información detallada sobre los esfuerzos y la influencia del material en relación con la humedad, un aspecto que hasta ahora se había explorado principalmente en entornos de laboratorio y que puede no representar completamente las circunstancias en el lugar.

El estudio resulta relevante para esta tesis al evidenciar la significativa relevancia de medir con precisión el contenido de humedad en el proceso de construcción de pavimentos.

En el Instituto Agrosphere de Alemania, se llevó a cabo la investigación titulada "Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability," presentada en la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo. Entre las conclusiones clave de este estudio se encuentran las siguientes:

Este análisis ha confirmado la factibilidad de la red de detectores portátiles SoilNet para examinar los patrones de contenido de agua en el suelo (SWC) a nivel de recogida de aguas altas. Se registraron más de seis millones de mediciones entre agosto y noviembre de 2009, evidenciando que la idea de utilizar una red de sensores inalámbricos subterráneos puede implementarse con éxito en captaciones de cabeceras de bosques de baja altitud. Un examen estadístico de los datos de SoilNet reveló una variabilidad relativamente elevada en SWC, consistente con investigaciones anteriores en zonas montañosas. Los registros de la red de sensores exhibieron menos dispersión en comparación con estudios que se basan en medidas intermitentes de SWC, señalando que las redes de sensores posibilitan la obtención de información más minuciosa sobre el procedimiento que provoca la variación de SWC.

Se advirtió que la variabilidad en el contenido hídrico del suelo (SWC) a 50 cm de profundidad fue significativamente menor que a 5 cm, insinuando que los factores que regulan el mayor tiempo de desplazamiento reducen la variabilidad espacial del SWC. Durante periodos secos, las características topográficas exhibieron la mayor correlación con el SWC, indicando que el control topográfico en el patrón de

SWC depende del estado hídrico del suelo. Los resultados de la interpolación sugirieron que la elevada densidad de muestreo permitió capturar los patrones esenciales de la variación del SWC en la cuenca. El trabajo futuro se centrará en ampliar las mediciones de puntos a escalas más amplias, utilizando datos de SoilNet para validar estimaciones SWC basadas en sensores remotos o resultados de modelos hidrológicos distribuidos, y examinar la variación espaciotemporal de SWC en escalas de tiempo cortas (<1 día). La relevancia de este antecedente para la investigación actual reside en la inclinación hacia la utilización de sensores para evaluar diversas características del suelo, especialmente el contenido de humedad.

2.6.2. Antecedentes nacionales

Reyna (2015) plantea su tesis: “sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero” en la Universidad Católica del Perú en Lima. El sistema diseñado utilizó un sensor de humedad DHT22 con un rango operativo de 0 a 100 % y una tolerancia de ~2 %. Además, se seleccionaron actuadores para permitir el suministro de agua y la ventilación del invernadero para cambiar la humedad, se usaron válvulas electromagnéticas para permitir que el agua pasara a través del rociador y se emplearon tres mecanismos para operar los movimientos de apertura y cierre de las ventanas en el invernadero. Paralelamente, se diseñó una interfaz de usuario que permitía supervisar las modificaciones en las variables controladas y controlar remotamente el actuador. Se llevaron a cabo pruebas y simulaciones del sistema propuesto, evidenciando que el sensor de humedad elegido es adecuado para este tipo de aplicaciones, permitiendo medir la humedad de manera eficiente y sencilla. Además, se implementó una comunicación serial entre el sistema operativo y la computadora mediante una interfaz de usuario incorporada a simplificar el seguimiento y control de la configuración climática dentro del invernadero. Todo ello asegura la autonomía del invernadero. Esta tesis sirve sólo como referencia anecdótica, pues no hay tesis similares a la presente propuesta en el Perú.

Mamani Mamani & Paz Guillen (2022) plantean la tesis: “Control de humedad en suelos heterogéneos de infraestructura vial aplicando sensor capacitivo, Cusco, 2021”, Universidad César Vallejo, tuvo como objetivo de determinar la efectividad del monitoreo de humedad en suelos heterogéneos de infraestructura vial mediante sensores capacitivos. El tipo de estudio utilizado, el nivel de estudio descriptivo, el

diseño del estudio transversal cuasiexperimental. Población e Infraestructura Vial de la Provincia del Cusco. Calle Los Sauces en el barrio de San Sebastián mostrando la parte alta de Cusco. El valor de r^2 obtenido con el sensor de capacidad de agua es de 0.910 para suelo ML, 0.973 para suelo SM, 0.942 para suelo certificado, 0.884 para suelo clase maestra A y 0.975 para suelo clase maestra D, con un intervalo de confianza de 88.4% ~ 97.5% de los resultados del sensor obtenidos. El tiempo es el 0.17% del tiempo de uso del método gravimétrico, y el costo de la prueba del sensor es el 6.05% del costo del método gravimétrico. Finalmente, se concluye que el uso de sensores capacitivos para el monitoreo heterogéneo de la humedad del suelo proporciona suficiente eficiencia con significativa confiabilidad, además de las ventajas de corto tiempo para obtener resultados y bajos costos.

Huallpa Pucapuca (2021) plantea la tesis “Diseño de un sensor para la determinación del contenido de la humedad in-situ como parte de control de calidad en la construcción de pavimentos en el distrito de Checacupe, Canchis, Cusco, 2021”, Universidad César Vallejo, escuela de Ingeniería Civil, y propone el diseño de un sensor para detectar La evaluación del contenido de humedad en el suelo se considera como parte integral del control de calidad en la edificación de pavimentos para facilitar las mediciones. Los parámetros se pueden establecer proporcionando a los técnicos equipos económicos que puedan medir muestras de suelo directamente de la cantera y caracterizar sus propiedades físicas permitió obtener resultados precisos en un breve lapso de tiempo, evitando la necesidad de transportar las muestras al laboratorio. Después, una porción del tamiz núm. 4 clasificados como suelos. Al suelo seco se le añadió agua de 0,6% a 16% y se midió la humedad en laboratorio (horno), método de succión matricial y sensores. El tipo de estudio se identificó como diseño cuasiexperimental y se analizaron 26 muestras. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se utilizó el coeficiente de Pearson para obtener un coeficiente de correlación clasificado como medio/alto.

La importancia de este precedente para la investigación actual radica en destacar la tendencia del uso de sensores en el contexto peruano. Además, revela que el desarrollo e implementación de estos sistemas es aún incipiente, lo cual sugiere un amplio potencial para las futuras investigaciones que empleen enfoques similares.

2.6.3. Antecedentes locales

Palomino Vásquez (2021) plantea la tesis “Análisis correlacional de resistividad y capacitancia con contenido de humedad en arcilla, arena y material base de pavimento, Cusco 2021” implica emplear sensores de resistencia y capacitancia para evaluar la proporción de humedad presente en distintos tipos de suelo. El propósito del estudio es analizar la relación entre los métodos resistivos y capacitivos y el contenido de humedad de diferentes suelos. Variables: Método de medición y precisión del método. Alcance y enfoque en el nivel de correlación cuantitativa. Programar con Arduino es un tipo de aplicación. Población estudiada: margen arcilloso o industrial, arena del río Huambutio; Material de embalaje primario de la zona de Sencca. Conclusión: Tanto los sensores resistivos como los capacitivos tienen una mala correlación con la humedad del suelo. Además, ambas estrategias de medición son relevantes para medir la humedad de la arena. Se encontró que las mejores y más altas correlaciones de los métodos investigados ocurrían cuando el material original estaba presente. Por lo tanto, asumiendo por razones estadísticas que esta corrección de correlación se debe al pequeño tamaño de partícula del material investigado, se encontró que ambos sensores eran mejores para medir el contenido de humedad del material base.

Sallo Jean. Enrique. (2018) plantea la tesis “Optimización del tiempo de obtención de resultados de contenido de humedad en arcillas para la fabricación de ladrillos en la cantera de Piñipampa” en la Universidad Alas Peruanas en la Universidad Alas Peruanas. Demuestra que el nivel óptimo de contenido de humedad, definido en $22.2\% \pm 0.5\%$, puede ser evaluado mediante un método que optimiza el tiempo de medición y emplea un sensor resistivo. Este enfoque resulta eficiente, considerando que cada prueba tiene un costo de S/. 0.12, en comparación con el costo promedio de S/. 30.00 por análisis de contenido de humedad disponible en los laboratorios locales. Se ha establecido que el contenido de humedad óptimo para la arcilla destinada a la fabricación de ladrillos es del $22.2\% \pm 0.5\%$. Para este propósito, se ha empleado el método convencional de secado en un horno de tiro forzado a 110°C durante 24 horas. Además, se ha llevado a cabo la calibración del sensor de humedad, determinando que un contenido de humedad del 22.2% equivale a una lectura de 16.3 en una escala de 0 a 1028.

2.7. Hipótesis

2.7.1. Hipótesis General

Con el diseño, implementación y evaluación de un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos permitirá su evaluación y comprobará la viabilidad de su uso para las operaciones de prospección de suelos en el distrito de San Sebastián.

2.7.2. Hipótesis Específicas

- a) Los componentes de un equipo electrónico para la medición de la humedad y temperatura de suelos son de tipo electrónico y en plataforma Arduino, se utiliza sensores de tipo capacitivo, programados en lenguaje Arduino con pantallas LCD.
- b) En la implementación del equipo electrónico para la medición de la humedad de suelos, en principio se ensamblará el equipo electrónico con los componentes con componentes importados, luego será puesto a prueba en tres suelos en una zona puntual de la ciudad del Cusco. Quedará demostrada la utilidad del instrumento para el monitoreo de nivel freático en taludes de suelo para obras de contención dentro del ámbito de la ingeniería civil.
- c) Los resultados de la evaluación de la humedad en suelos en el distrito de San Sebastián aplicando el equipo electrónico implementado deben arrojar una precisión de aceptable en comparación con el método base del horno geotécnico de tiro forzado.

2.8. Identificación de Variables e Indicadores

Se han identificado las siguientes variables del estudio:

- a) Contenido de humedad en porcentaje obtenido por el método gravimétrico estándar (ASTM D2216-19).
- b) Contenido de humedad en porcentaje obtenido por el método resistivo de bajo costo (MSE).

CAPÍTULO III. DISEÑO DEL DISPOSITIVO

3.1. Diseño del Sensor de Humedad

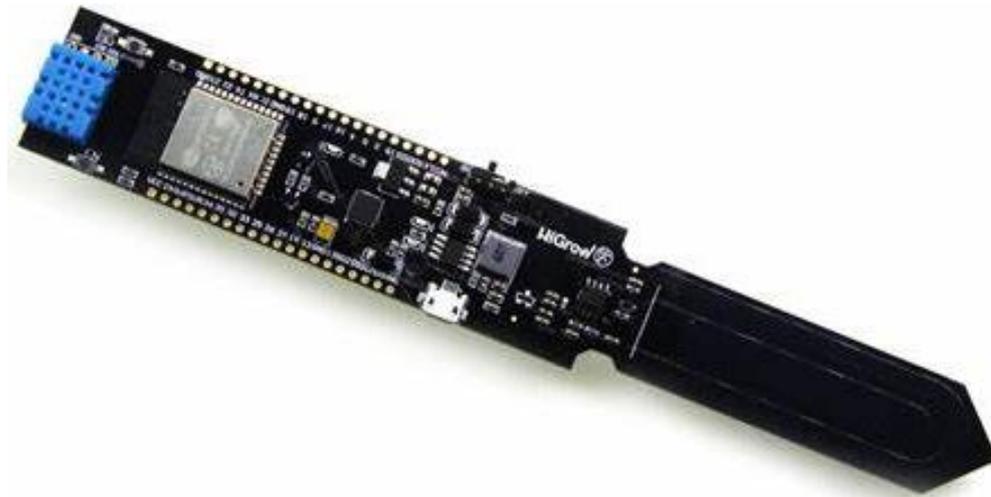
Descripción del proceso de diseño del equipo

En principio se tenía en mente la implementación de un equipo que tuviera tres partes fundamentales primero el sensor del fenómeno a medir, en este caso la humedad del suelo; segundo, el procesamiento y visualización de los datos emitidos por el sensor y finalmente la fuente de energía de todo el sistema.

Para el caso del sensor se probaron múltiples marcas modelos y tipos de sensor, todos provenientes de fabricantes chinos, se probaron tanto sondas resistivas como capacidad activa decidiéndose por estas últimas a raíz de que las resistivas tenían una vida útil muy pequeña al ser muy sensibles a la corrosión.

Figura 9

Sonda del instrumento



Nota. Fuente y elaboración propias.

Para el caso del diseño del sistema de procesamiento se utilizaron las tarjetas Arduino uno.

Figura 10

Placa Arduino UNO

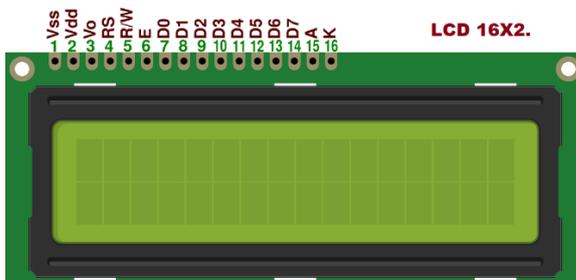


Nota. Fuente: Aliexpress.com

Respecto del módulo de visualización de los datos emitidos por los sensores, se probaron dos tipos de pantallas una LCD de ocho caracteres y otra LCD de 16 caracteres en dos filas, siendo esta última la mejor opción para la visualización de los datos.

Figura 11

Pantalla LCD 2x16



Nota. Fuente: Aliexpress.com

El tema crítico se encontró en el diseño de la fuente de energía de todo el sistema, pues las pilas alcalinas ya sean AA o AAA no aportan suficiente energía al sistema para el monitoreo durante los días requeridos, con esta consideración se optó por colocar en el sistema una batería de ion litio usada fundamentalmente para la carga de celulares de alta gama, la batería tenía un amperaje de 20,000 mA, permitiendo un monitoreo constante de la humedad durante una semana.

Figura 12

Bateria recargable

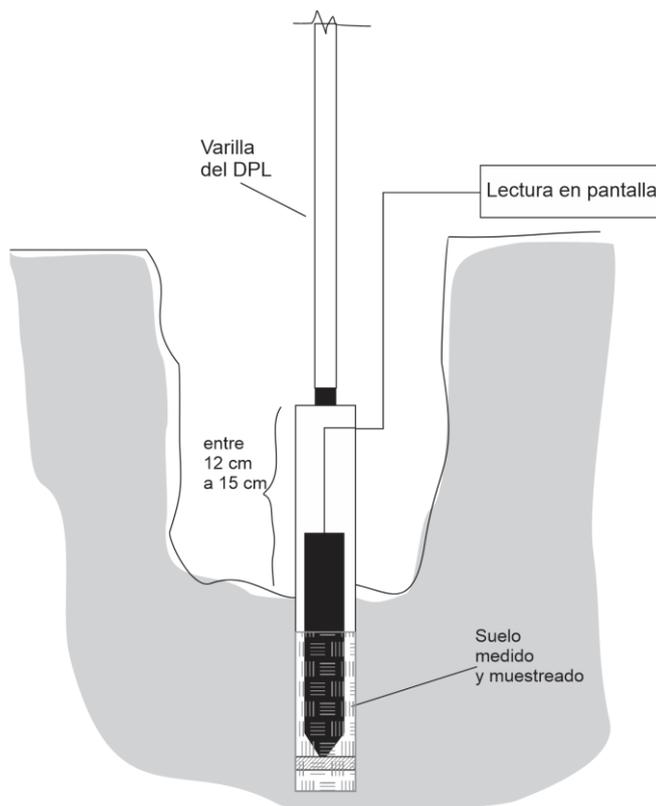


Es de mencionar que todas las conexiones y cableados del sistema se diseñaron para estar completamente aislados tanto de la humedad como de las partículas de suelo, pues durante las pruebas previas del piloto se detectó que si un poco de suelo ingresa a los pines de conexión de cualquier parte del sistema, entonces la lectura se ve alterada porque el suelo carga eléctricamente los cables, de manera que se utilizó silicona termo plástica para aislar las mencionadas conexiones

El sensor de humedad está constituido por las partes que se muestran en el esquema adjunto.

Figura 13

Esquema de penetración del instrumento



Nota. Fuente y elaboración propias.

3.2. Proceso de Ensamblado del Sensor de Humedad

- a) En principio se procedió a soldar los 16 pines de la pantalla al módulo I2C. 2.
- b) Seguidamente, se conectó a través de soldadura los pines de datos y energía de la pantalla a la tarjeta Arduino uno.
- c) Luego, se procedió a soldar los cables de voltaje, tierra y datos al sensor de humedad por uno de sus extremos y los otros extremos se soldaron a los pines A0, GND y V5 que son datos, tierra y energía respectivamente.
- d) Finalmente se procedió a conectar la batería a las tarjetas Arduino uno.

3.3. Diseño del Sensor de Temperatura

Descripción del proceso de diseño del equipo.

Para el caso de la sonda para temperatura existen diferentes tipos, provenientes de fabricantes chinos, y optamos por el modelo DS18B20.

Figura 14

Sonda del instrumento



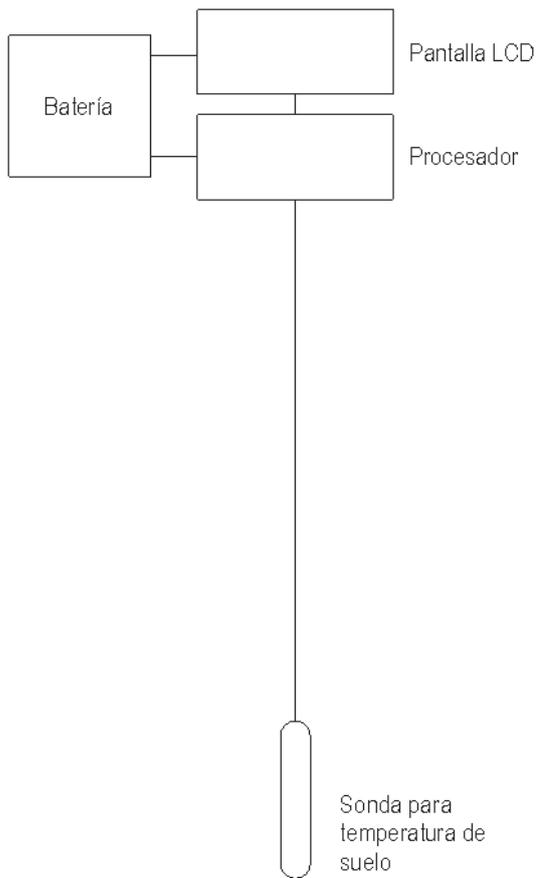
Para el caso del diseño del sistema de procesamiento se utilizó Arduino uno, como se muestra en la figura 10.

Respecto del módulo de visualización de los datos emitidos por los sensores, se utilizó un LCD de 16 caracteres en dos filas, como se visualiza en la figura 11.

En cuanto a la fuente de energía optó por colocar en el sistema una batería de ion litio usada fundamentalmente para la carga de celulares de alta gama, la batería tenía un amperaje de 20,000 mA, permitiendo un monitoreo constante de la temperatura.

Figura 15

Esquema del sensor de temperatura



CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

4.1. Construcción del Dispositivo

4.1.1. Descripción de dispositivo

En los siguientes párrafos, se detallará la configuración y codificación de un sensor de humedad del suelo que se utilizó en los experimentos llevados a cabo en esta investigación.

4.1.2. Componentes del sistema (hardware)

Hardware Arduino

Arduino representa una plataforma para el desarrollo de prototipos electrónicos que se basa en hardware y software de código abierto, siendo fácil de utilizar. Con esta placa, es posible construir y programar circuitos electrónicos. En el caso específico de la placa Arduino UNO, presenta varias características destacadas. Su microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de realizar operaciones matemáticas complejas a alta velocidad.

La alimentación de la placa Arduino se realiza a través del puerto USB durante el proceso de programación. Una vez que ha sido programada, puede desconectarse del ordenador y operar de manera autónoma, siendo alimentada por una fuente de alimentación externa o una pila de 9V.

La distribución de pines en Arduino UNO incluye 14 pines digitales que pueden configurarse como entradas o salidas. Seis de estos pines, marcados con el símbolo "~", pueden utilizarse como señales digitales PWM. Asimismo, dispone de 6 pines analógicos marcados desde A0 hasta A5 para entradas analógicas. Además, se encuentran 3 pines GND destinados a conectar los circuitos a tierra. Por último, la placa cuenta con dos pines de alimentación, uno de 5V y otro de 3.3V respectivamente (fuente: aprendiendoArduino.wordpress.com).

En la Ilustración precedente se observa el sensor soldado, listo para ser adosados a el tubo, para luego proceder con la operación de aislamiento total del sistema mediante una manga plástica.

Figura 16

Vista de una placa Arduino UNO



Nota. Fuente: <https://aprendiendoArduino.wordpress.com/category/sensores/>
<http://www.cmtmoisturemeters.com.au/product/trime-pico-32->

Cable AB

Este representa el USB más reconocido y común, razón por la cual se denomina USB estándar. El cable USB Tipo A consta de dos extremos: uno que se conecta al dispositivo receptor, como una computadora, denominado conector macho Tipo A, mientras que el puerto receptor se identifica como puerto A femenino.

En uno de sus extremos, cuenta con un conector estándar Tipo B, siendo particularmente útil para enlazar impresoras. Además, se emplea de manera extensa en la conexión del conocido Arduino UNO en el otro extremo. (<https://electronilab.co/tienda/cable-usb-tipo-ab-de-impresora/>).

Figura 17

Vista de un cable AB



Nota. Fuente: <https://www.hosteconline.com/uy/accesorios/cable-usb-ab-3-metros/>
<http://www.cmtmoisturemeters.com.au/product/trime-pico-32->

Sensor de humedad del suelo YL-69

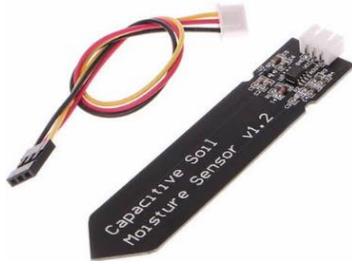
Este sensor posee la habilidad de evaluar la humedad del suelo. Al aplicar una ligera tensión entre los terminales del módulo YL-69, se genera una corriente que está directamente relacionada con la resistencia presente en el suelo, siendo esta resistencia fuertemente influenciada por la humedad. En consecuencia, un aumento en la humedad resulta en un incremento de la corriente, mientras que una disminución de la humedad conlleva a una reducción de la corriente.

Se compone de una sonda YL-69 que cuenta con dos terminales estratégicamente separados, junto con un módulo YL-38 que incorpora un circuito comparador LM393 SMD (montaje superficial) altamente estable, así como un indicador LED de encendido y otro para señalar la activación de la salida digital. Este último posee 2 pines de conexión con el módulo YL-69, así como 2 pines destinados a la alimentación y 2 pines de datos identificados como VCC, GND, D0 y A0. Las especificaciones del sensor son las siguientes:

- Tensión de entrada: 3.3 - 5 VCD
- Tensión de salida: 0 ~ 4.2 V
- Corriente: 35 mA
- VCC: Suministro de energía
- GND: Conexión a tierra
- A0: Salida analógica que proporciona un voltaje proporcional a la humedad. Puede ser directamente medida desde un puerto analógico en un microcontrolador, con Arduino, CI, etc.
- D0: Salida digital; este módulo permite ajustar cuándo el nivel lógico en esta salida cambia de bajo a alto mediante el potenciómetro.
- Medidas: 60 x 30 mm

Figura 18

Vista de un sensor de humedad



Nota. Fuente: <https://www.amazon.es/WINGONEER-humedad-higr%C3%B3metro-detecci%C3%B3n-Arduino/dp/B01H6WK51I><http://www.cmtmoisturemeters.com.au/product/trime-pico-32->

4.1.3. Componentes del sistema (hardware)

La figura siguiente presenta el diagrama de conexión entre la tarjeta Arduino Uno y el sensor de humedad. De igual manera, se muestra a continuación el esquema de conexión del transductor del sensor de humedad.

4.1.4. Código de programación

Inicialmente, se han establecido dos variables, una destinada al pin del sensor de humedad del suelo y la otra para almacenar la salida del sensor.

```
int sensor_pin = A0; // Soil Sensor input at Analog PIN A0  
int output_value ;
```

Dentro de la función de configuración, la instrucción "Serial.begin(9600)" facilitará la comunicación entre Arduino y el monitor de serie. Posteriormente, se realiza la impresión de "Lectura del sensor..." en el monitor serial.

```

unsigned long time;
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
//I2C pins declaration
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
const int threshold = 91; //para que el sensor pare de leer a los 90 segundos

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16,2); //Defining position to write from first row,first column .

```

```

//lcd.clear();
}
void loop(){
  int sensorvalue=analogRead(A0);
  time = millis()/1000;
  delay(10000); // wait 10 seconds so as not to send massive amounts of data
  if (time < threshold) {
    lcd.clear();
    lcd.print("Tiempo: ");
    lcd.print(time);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("L: ");
    lcd.print(sensorvalue);
    Serial.println(time);
    Serial.println(sensorvalue);
  }
}

```

Dentro del bucle principal, se efectúa la lectura del pin analógico del sensor, almacenando los resultados en la variable "output_value". Posteriormente, ajustamos los valores de salida a un rango de 0 a 100, ya que la humedad se expresa en porcentaje. Al tomar lecturas en un suelo seco, el valor del sensor era 550, mientras que en un

suelo húmedo era 10. Por ende, llevamos a cabo un mapeo de estos valores para obtener la lectura de humedad. Finalmente, estos valores se imprimen en el monitor serial.

4.2. Calibración del Dispositivo

4.2.1. Proceso de calibración del equipo

Para la calibración del equipo, se tomó en consideración el límite de humedad que puede detectar el sensor reportado por el fabricante del mismo este límite está entre 4 y 30 por ciento, de manera que las mezclas de suelo con agua para la calibración se distribuyeron en seis partes entre estos límites, siendo esa la forma como se decidió que cantidad de agua se suministraba a cada muestra.

Figura 19

Dispositivo terminado para calibración





Para realizar la calibración del equipo se siguió los pasos siguientes:

Instalación de la mesa con materiales como son las cubetas, suelo, agua destilada, balanza, probeta.

Se preparó el suelo con humedad controlada.

Figura 20

Pesado del suelo



Se introdujo el sensor en el molde Proctor con el suelo compactado.

Se esperó la lectura del sensor.

Realizada la lectura pasamos al vaciado de las capsulas de suelo para ponerlas en cubetas metálicas y llevadas al horno para su correspondiente secado.

Figura 21

Detalles del tubo

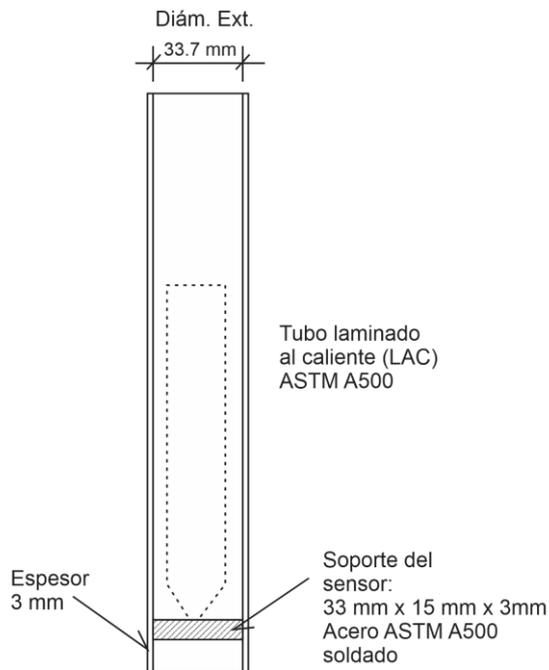


Tabla 2

: resumen de datos de calibración en laboratorio.

Lectura	COD. CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA	PESO CAP + SUELO HUMEDO	PESO CAP + SUELO SECO	W%	Lectura
541	4B	18.86	94.12	89.5	6.54	541
547	11A	18.48	91.5	86.08	8.02	547
545	4A	20.08	78.42	73.68	8.84	545
562	11C	19.82	83.46	77.72	9.91	562
565	6B	19.84	56.94	53.4	10.55	565
564	B2	21.72	111.34	101.88	11.80	564
566	7C	19.6	98.02	90.5	10.61	566
559	2B	19.5	84.32	77.74	11.30	559
562	1C	19.98	94.68	86.48	12.33	562
561	3A	18.08	121.3	110.36	11.86	561
465	1B	17.86	32.16	32.1	0.42	465
485	10C	18.98	32.98	32.68	2.19	485
513	9B	18.26	29.7	29.3	3.62	513
540	T28	10.16	54.08	51.36	6.60	540
510	T24	10.9	44.74	43.96	2.36	510
526	T30	11.14	29.56	28.96	3.37	526

CAPÍTULO V. EVALUACIÓN DEL DISPOSITIVO

5.1. Perforación de las Auscultaciones

La perforación de las auscultaciones se realizó primero a través de una barreta, posteadora, etc. hasta una profundidad de 0.78 m, luego con la ayuda de una portadora se profundizó la auscultación hasta las alturas requeridas, la operación se muestra en la figura siguiente.

Figura 22

Perforación de la auscultación



5.2. Inserción del Sensor

A continuación, se hace la medición del orificio del suelo, para luego introducir el sensor dentro de la auscultación, la operación se muestra en la figura siguiente.

Figura 23

Colocación del sensor y el instrumento



Una vez preparado el sensor se procedió a insertar dentro del agujero de prospección teniendo cuidado de que el suelo permanezca en su sitio, esto se realizó a través del izaje del equipo de lectura de sensor de humedad, la operación se muestra en la siguiente figura.

Figura 24

Inserción del sensor dentro del agujero de auscultación



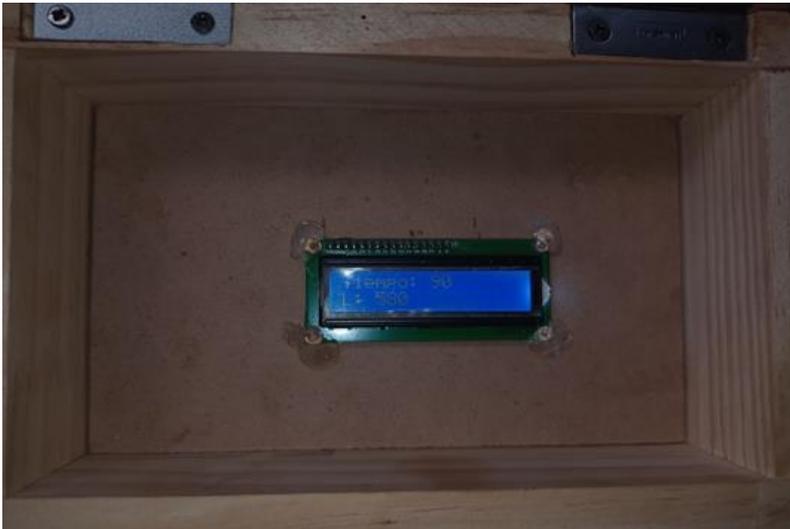
Con la finalidad de evitar el derrame del suelo se introdujo con cuidado el tubo del instrumento, hasta que este firme en el fondo, luego se procedió a soltar la masa deslizante del equipo de penetración dinámica ligera para clavar el sensor en el fondo del agujero.

5.3. Recolección de Datos

La recolección de datos se realizó a través de la pantalla instalada en el dispositivo y se hizo en diferentes puntos y a profundidades distintas para determinar la variación del contenido de humedad en el suelo, así como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 25

Toma de datos en campo con el sensor



Luego de la toma de datos se procedió a tabular los mismos como un paso previo para su análisis e interpretación, los resultados se muestran a continuación.

5.4. Muestreo en Campo con el Instrumento

Para la calibración en campo se siguió el siguiente programa de ensayos:

PROGRAMACION DE ENSAYOS Y MUESTREOS DE HUMEDAD										
RESPONSABLE:		Vladimir E. Madera Olivera								
UBICACIÓN:		Urbanización Tupac Amaru - San Sebastián								
ÁREA DE ENSAYO:		305.00 m ²								
TOTAL DE PERFORACIONES		Cant: 1 de 1.80mts				Cant: 8 de 0.80 mts				
DISTANCIA ENTRE PUNTO DE PERFORACIONES		Cada 4.00 mts entre puntos								
Set - Oct 2023										
ITEN	DESCRIPCION	ALT. PERFORACION 01	ALT. PERFORACION 02	ALT. PERFORACION 03	CANTIDAD DE PUNTOS	28	29	30	1	2
						JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO	LUNES
1	Perforación de terreno para ver el nivel freático	1.80 mts			1	P.N.F				
2	Perforación del terreno para hacer la lectura con el equipo (P01 ,P02, P03,P04,P05, P06, P07, P08)	0.40 mts	0.60mts	0.80mts	8	P01;P02	P03;P04,P05	P06;P07;P08		
3	Lectura de humedad ,hecha con el equipo	0.40 mts	0.60mts	0.80mts	24	P01;P02	P03;P04,P05	P06;P07;P08		
4	Toma de muestra	0.40 mts	0.60mts	0.80mts	24	P01;P02	P03;P04,P05	P06;P07;P08		
5	Pesaje de capsula vacia, + , pesaje de muestra y colocado de muestra en el horno de tiro forzado	0.40 mts	0.60mts	0.80mts	24	P01;P02	P03;P04,P05	P06;P07;P08		
10	Pesaje de muestra seca, + , lectura de peso en laboratorio	0.40 mts	0.60mts	0.80mts	24		P01;P02	P03;P04,P05		P03;P04,P08

Durante el programa de ensayos se aplicó en siguiente protocolo:

PROTOCOLO DE ENSAYO DE HUMEDAD

Responsable: Vladimir E: Madera Olivera.

Ubicación: Urb. Túpac Amaru – San Sebastián.

Fecha: noviembre 2023.

Paso 01.- Tener a disposición herramientas, materiales y equipo; necesario para hacer el procedimiento de ensayo; Pico, pala, barreta, posteadora, wincha, comba, equipo electrónico de lectura de humedad, DPL, 24 bolsas ziploc, y balde con tapa.

Paso 02.- Se procede a la perforación del suelo, con ayuda de una posteadora hasta la altura requerida, para realizar el ensayo de humedad.

Paso 03.- Instalación del equipo electrónico de lectura de humedad, al tubo de perforación del equipo dinámico de penetración ligera.

Paso 04.- Se acomoda el equipo en la perforación realizada, en seguida se instala la barra guía, el yunque y el martillo o masa deslizante del DPL, finalmente soltamos el martillo o masa deslizante del penetrometro por caída libre, logrando penetrar el equipo dentro del terreno, cuando menos 12 centímetros para proceder luego con la lectura.

Paso 05.- Se enciende el equipo electrónico, se esperan 90 segundos hasta que la lectura se estabilice, luego se realiza la lectura correspondiente.

Paso 06.- Se extrae la muestra del tubo de penetración del equipo, a una bolsa ziploc para llevar a laboratorio (este paso no se realizará en los próximos ensayos).

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Análisis de los Datos de Calibración en Campo del Instrumento

Una vez realizada la implementación del instrumento, debidamente conectado y aislado, se procedió a realizar la calibración del instrumento a través de la inserción del mismo en suelos con distinta humedad. Ejecutada en campo a profundidades de 0.4mts, 0.60mts y 0.80mts.

El resumen de datos de campo obtenidos durante el procedimiento de calibración se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Resumen de datos de calibración en campo y porcentaje de contenido de humedad de laboratorio.

P	N	L	Prof. (m)	Cód.Cap.	Wcap (g)	Cap.+Sh (g)	Cap.+Ss (g)	w%
P01	1	563	0.4	6A	19.9	56.7	49.7	23.5
P01	2	490	0.6	2A	18.7	54.8	48.2	22.4
P01	3	530	0.8	3A	18.1	50.2	44.5	21.6
P02	4	570	0.4	100	47.7	91.6	81.2	31.0
P02	5	471	0.6	105	46.9	91.1	85.3	15.1
P02	6	562	0.8	117	46.9	84.5	79.5	15.3
P03	7	558	0.4	46	47.5	89.9	83.1	19.1
P03	8	414	0.6	41	47.1	95.8	87.1	21.8
P03	9	497	0.8	47	47.3	107.4	93.3	30.7
P04	10	531	0.4	8B	19	67.1	56.5	28.3
P04	11	431	0.6	11B	17.9	68.4	57.9	26.3
P04	12	545	0.8	8C	20.4	79.6	67.9	24.6
P05	13	384	0.4	120	47.1	101.4	90.6	24.8
P05	14	547	0.6	44	47.8	113.5	101.7	21.9
P05	15	460	0.8	116	47.8	100.5	92.9	16.9
P06	16	567	0.4	112	46.9	100.4	92.5	17.3
P06	17	546	0.6	104	46.4	113.9	100.2	25.5
P06	18	461	0.8	107	47.4	107.7	96.3	23.3
P07	19	461	0.4	2C	19.6	50.6	45.3	20.6
P07	20	504	0.6	8A	18.8	53.1	50.1	9.6
P07	21	545	0.8	4C	18.5	67.4	64	7.5
P08	22	499	0.4	9B	18.4	48.7	43.5	20.7
P08	23	542	0.6	4A	20.2	62.4	58.4	10.5
P08	24	560	0.8	5A	18.5	65	61.8	7.4

Nota. L: Lectura analógica del sensor. w%: contenido de humedad porcentual por método ASTM D2216-19

Al respecto de la tabla, se debe comentar que haría falta mediciones tales como presión de poro, mineralogía, gradientes de temperatura, entre otros para indagar sobre los cambios ascendentes y descendentes de humedad y las diferencias en algunos casos.

6.1.1. Predicción de la humedad

La predicción de la humedad se ha realizado ajustando los resultados de la tabla precedente con una técnica denominada predicción por redes neuronales a través del software JMP Pro versión 17. Los resultados para cada pozo y cada altura se visualizan a continuación.

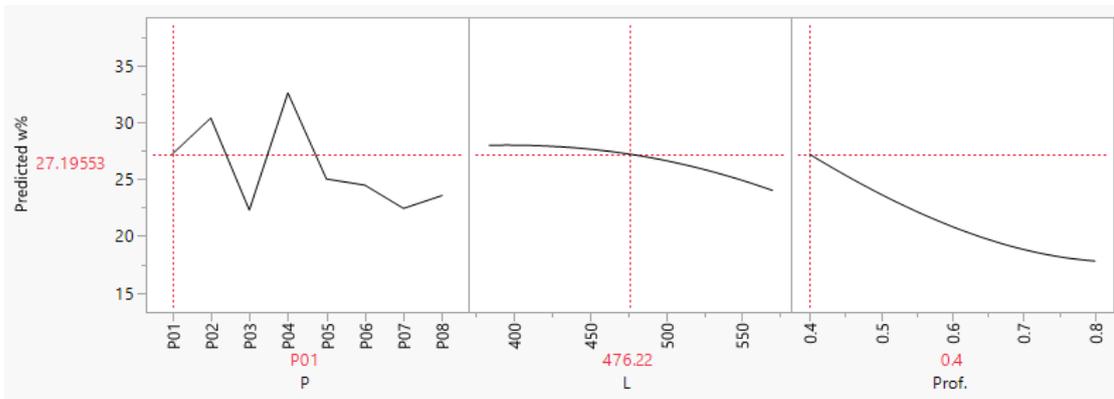
Para todas las figuras que siguen se tiene:

P: número de pozo en el cual se hace la medición.

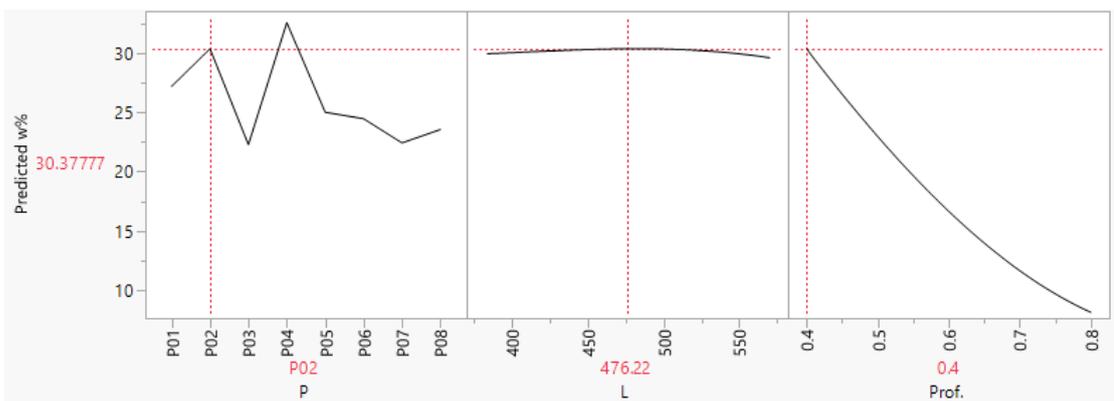
L: lectura del sensor evidenciada en la pantalla LCD.

Prof.: Profundidad medida a partir de la superficie libre del terreno, hacia abajo.

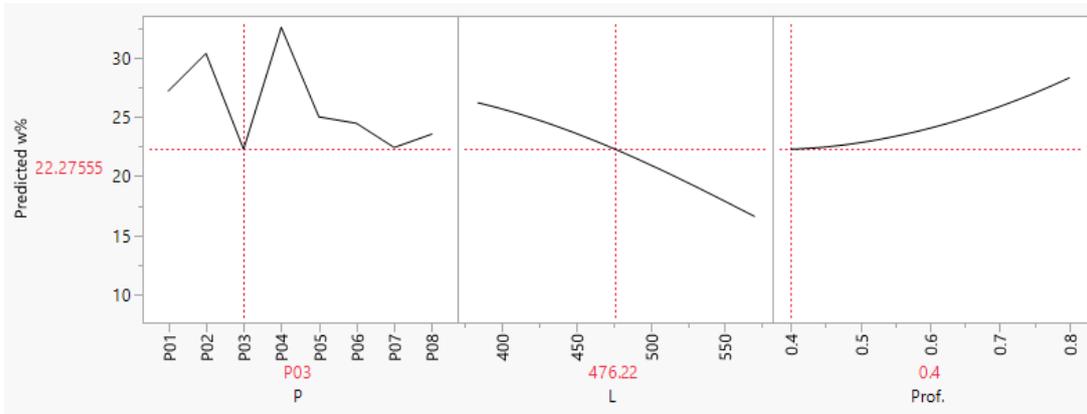
Para el pozo 1, a 0.40 de profundidad:



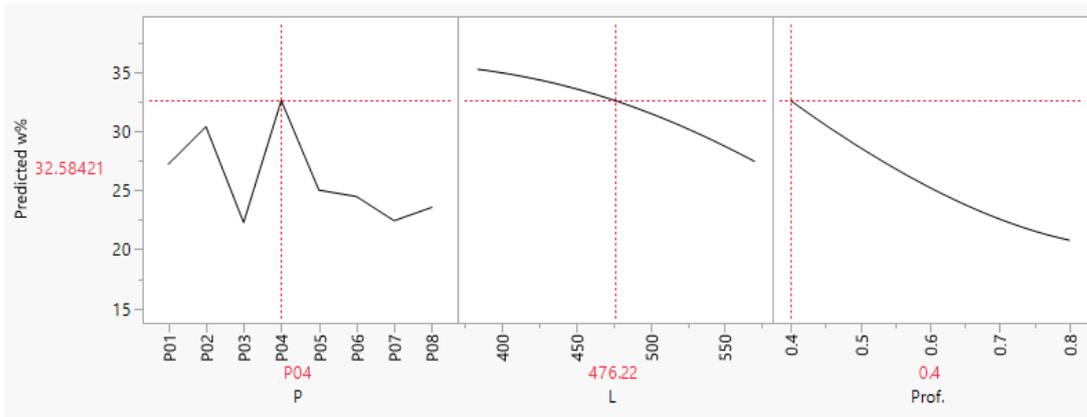
Para el pozo 2, a 0.40 de profundidad:



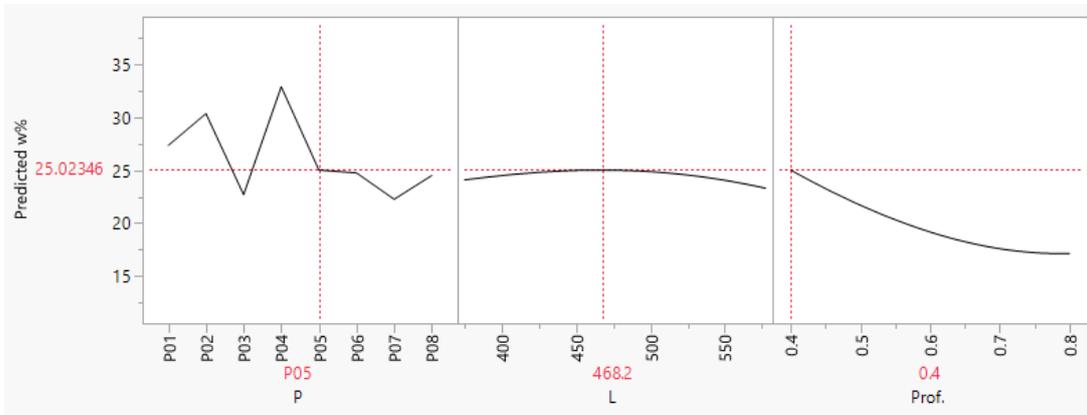
Para el pozo 3, a 0.40 de profundidad:



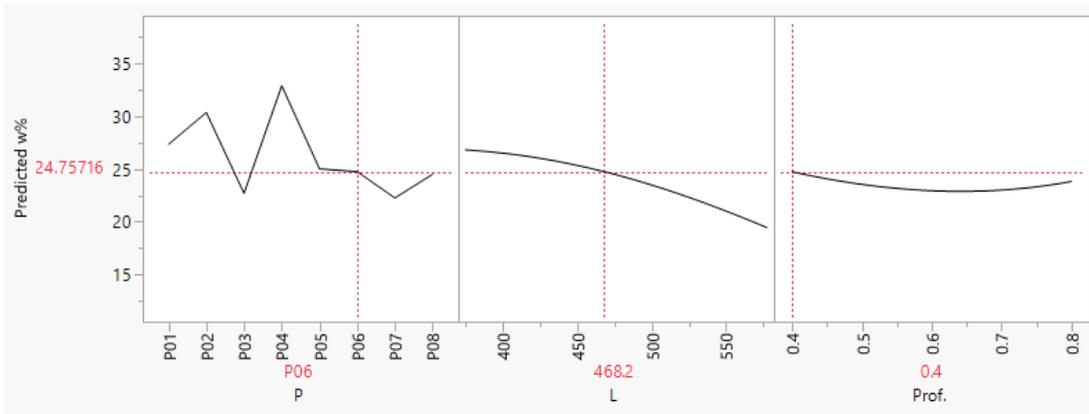
Para el pozo 4, a 0.40 de profundidad:



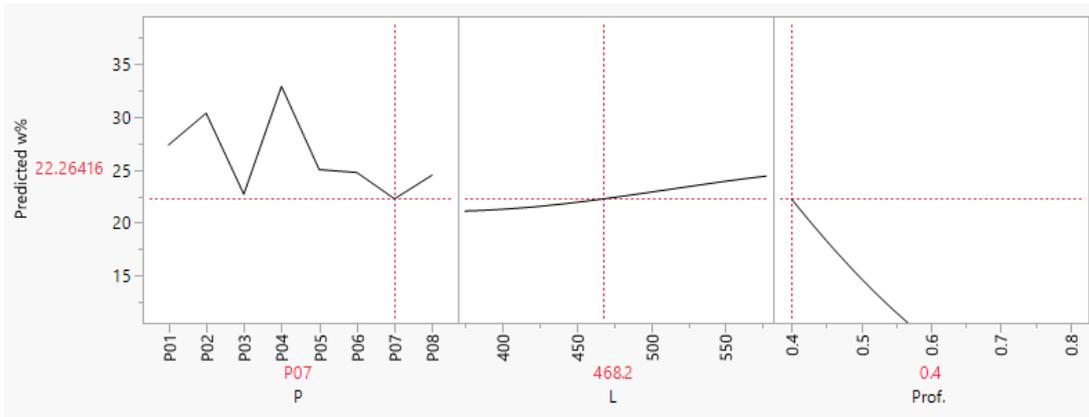
Para el pozo 5, a 0.40 de profundidad:



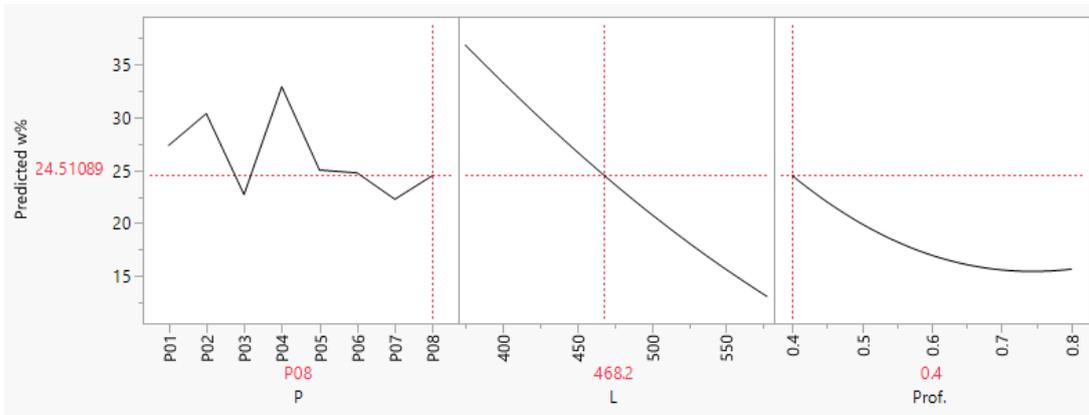
Para el pozo 6, a 0.40 de profundidad:



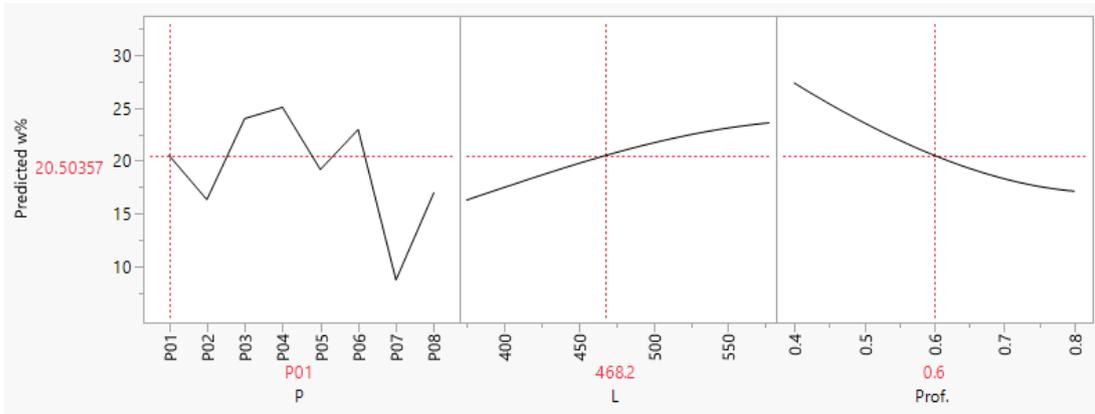
Para el pozo 7, a 0.40 de profundidad:



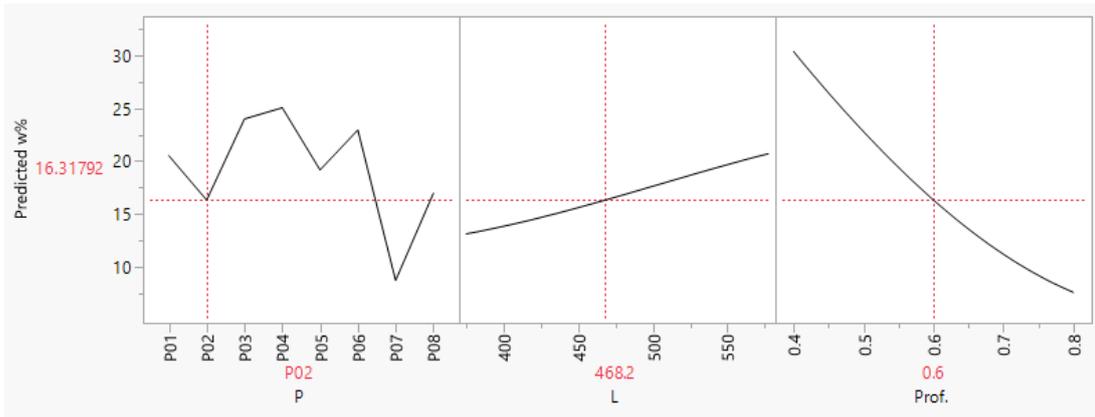
Para el pozo 8, a 0.40 de profundidad:



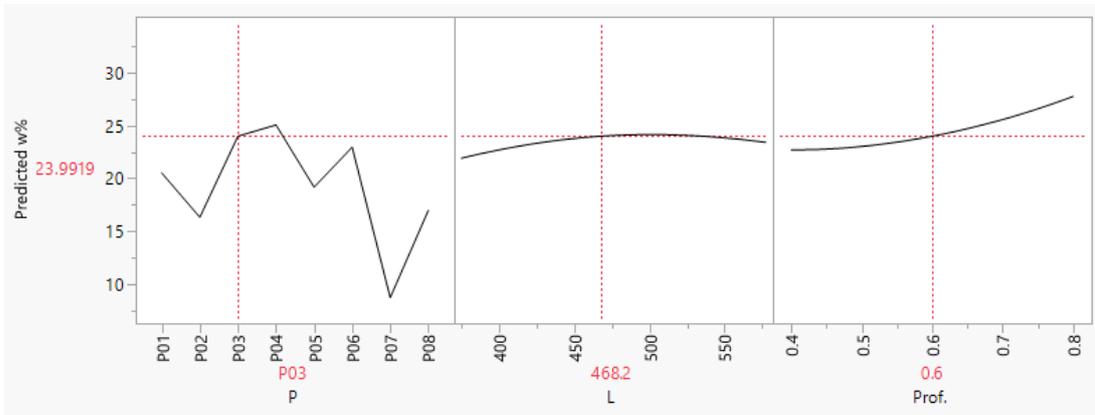
Para el pozo 1, a 0.60 de profundidad



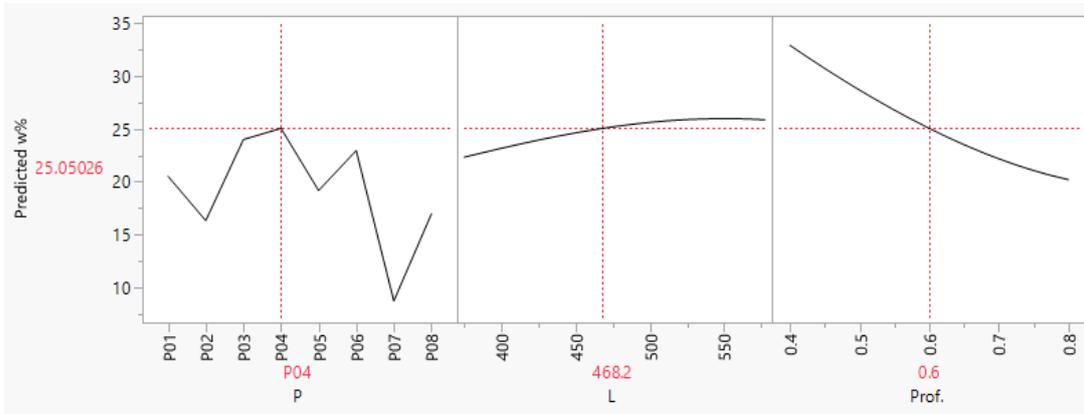
Para el pozo 2, a 0.60 de profundidad



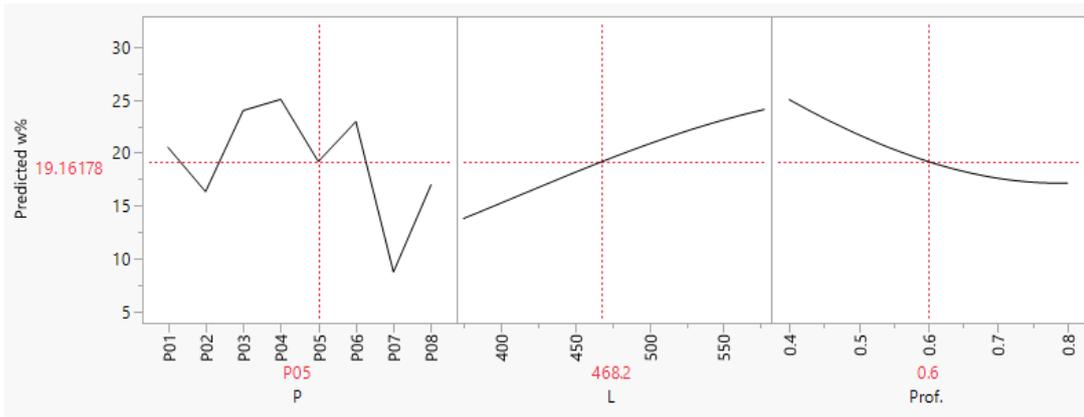
Para el pozo 3, a 0.60 de profundidad



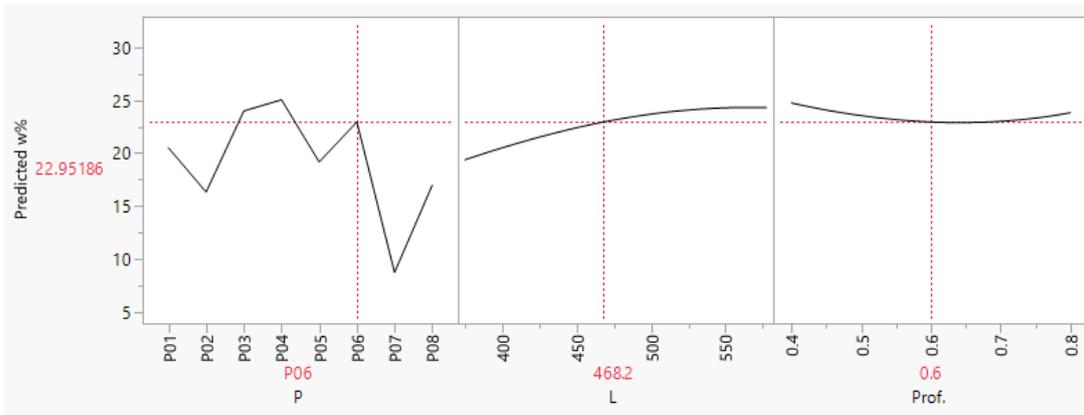
Para el pozo 4, a 0.60 de profundidad



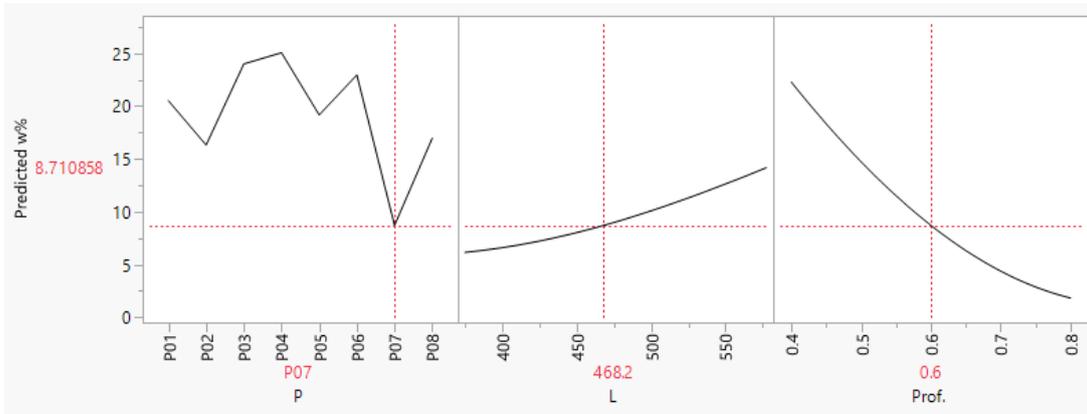
Para el pozo 5, a 0.60 de profundidad



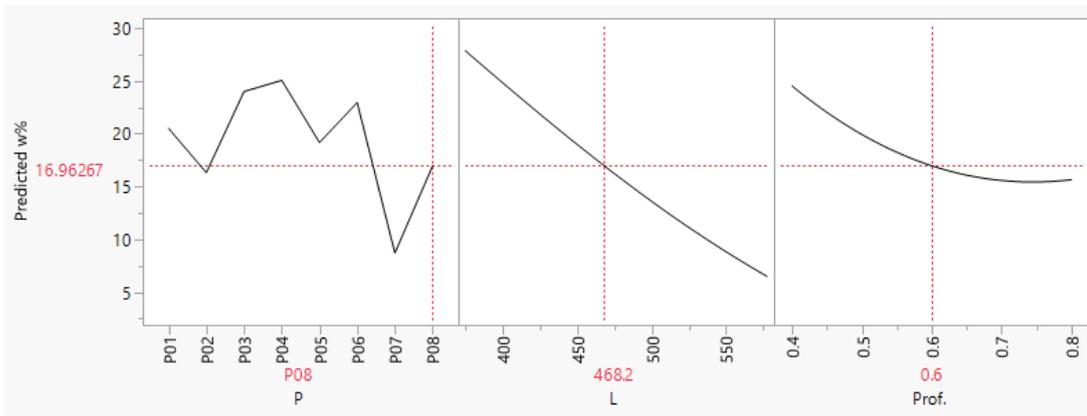
Para el pozo 6, a 0.60 de profundidad



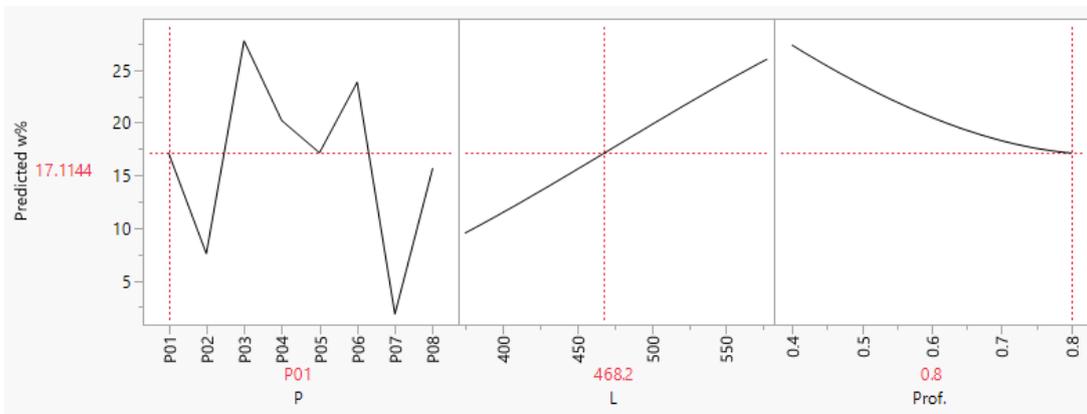
Para el pozo 7, a 0.60 de profundidad



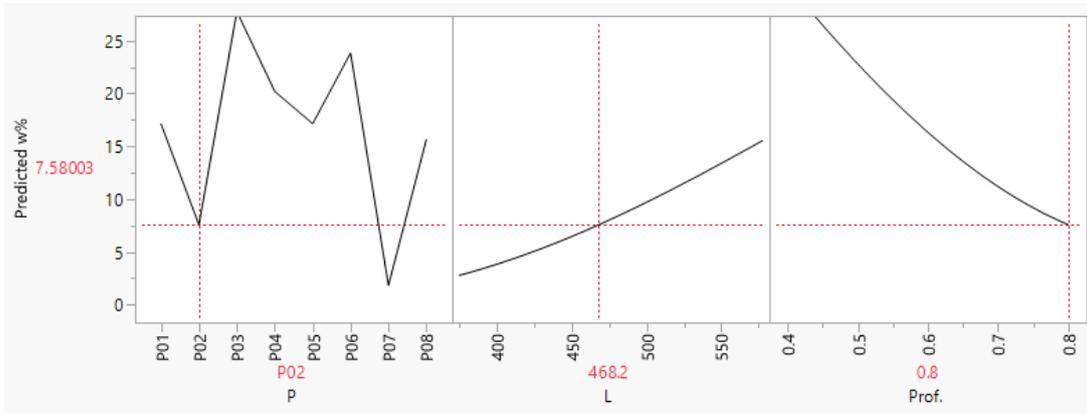
Para el pozo 8, a 0.60 de profundidad



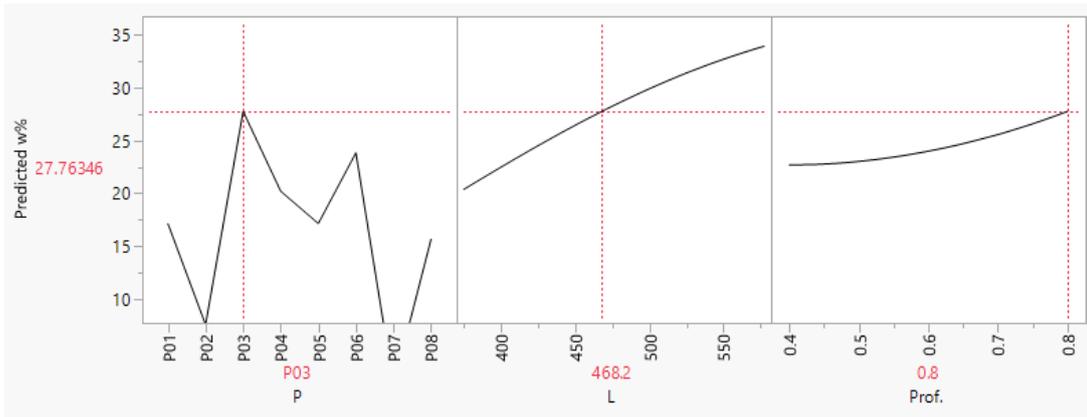
Para el pozo 1, a 0.80 de profundidad



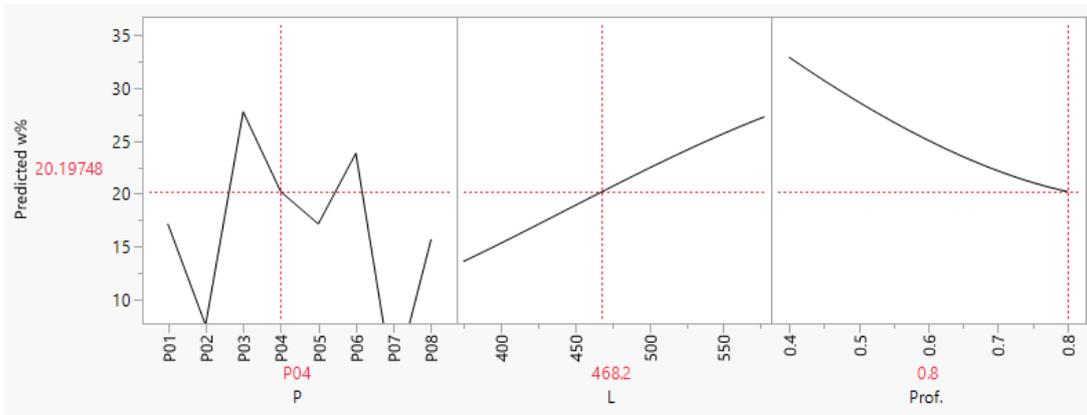
Para el pozo 2, a 0.80 de profundidad



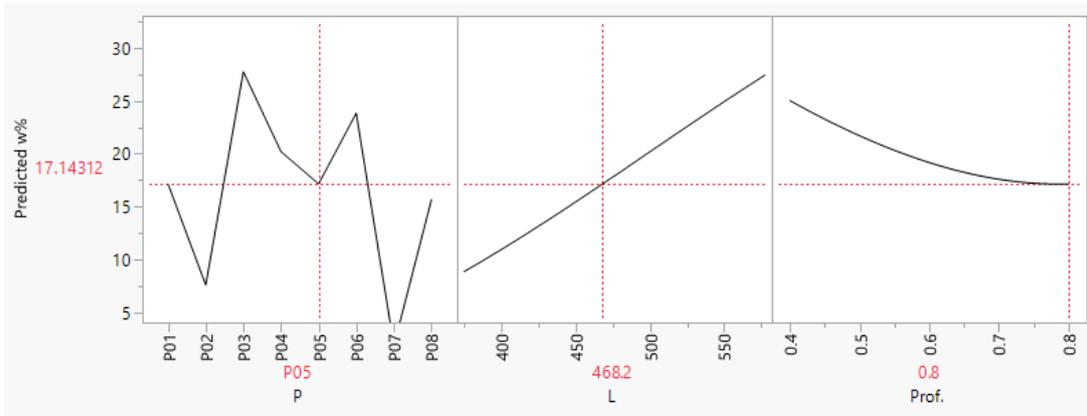
Para el pozo 3, a 0.80 de profundidad



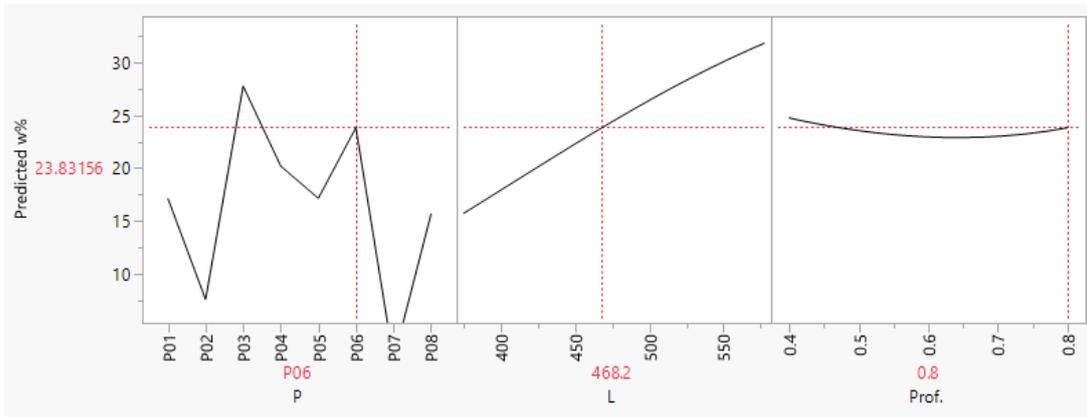
Para el pozo 4, a 0.80 de profundidad



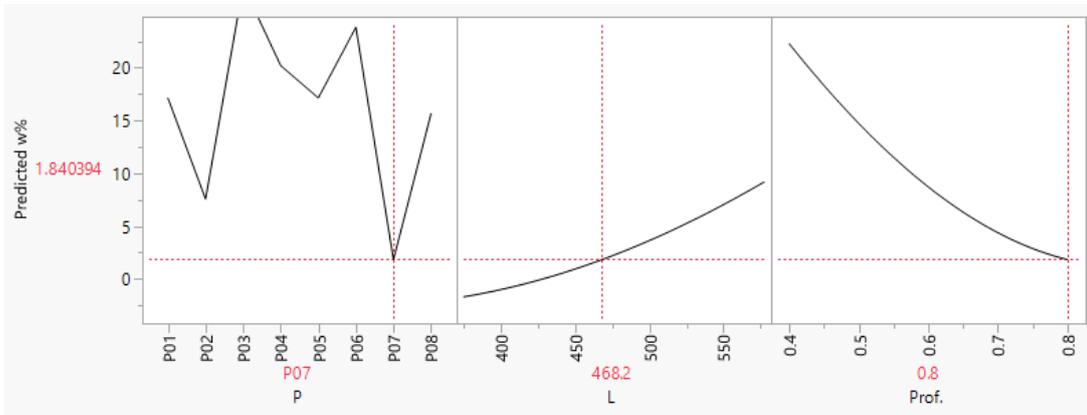
Para el pozo 5, a 0.80 de profundidad



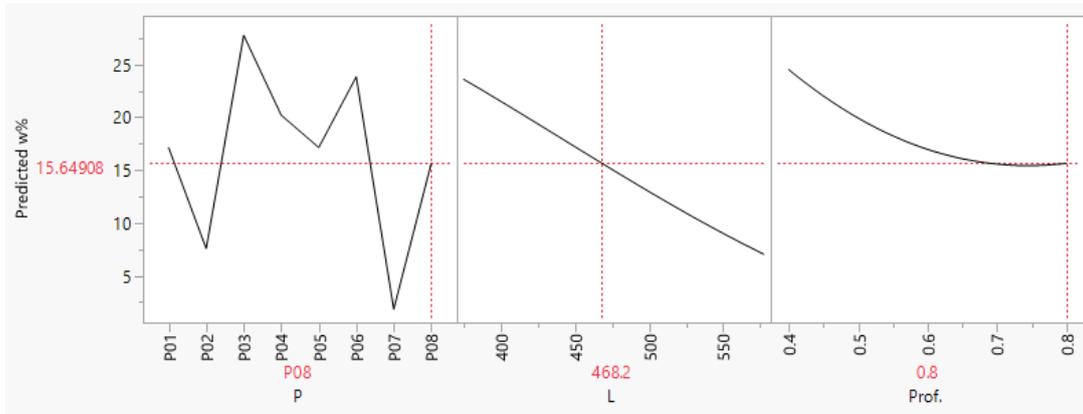
Para el pozo 6, a 0.80 de profundidad



Para el pozo 7, a 0.80 de profundidad



Para el pozo 8, a 0.80 de profundidad



Las características y parámetros de calidad de predicción de la red neuronal utilizada se muestran a continuación.

Neural

Validation: Random Holdback

Model NGaussian(3)

Training

w%

Measures	Value
RSquare	0.9564554
RASE	1.3251037
Mean Abs Dev	1.1628023
-LogLikelihood	27.206868
SSE	28.094396
Sum Freq	16

Validation

w%

Measures	Value
RSquare	0.9781787
RASE	1.0054143
Mean Abs Dev	0.9289767
-LogLikelihood	11.394706
SSE	8.0868627
Sum Freq	8

Conforme se aprecia, el modelo constituido por una sola capa gaussiana, tiene un buen ajuste. A continuación, se aprecia una tabla que resume lado a lado, la humedad medida por método tradicional, la lectura con el sensor, la función neuronal de correlación propuesta y la humedad obtenida con el sensor, luego la columna de diferencia y error obtenido, al pie las desviaciones simples, y la desviación standard.

Tabla 4

Humedad medida por método tradicional, la lectura con el sensor, la función neuronal de correlación propuesta y la humedad obtenida con el sensor

Humedad medida por el método tradicional (%)	Lectura con el sensor	H1_1	H2_2	H1_3	Humedad obtenida con el sensor (%)	Diferencia en puntos de humedad (%)	Error porcentual (%)
23.5	563	0.99647414	0.97328607	0.99212017	24.3	-0.8	-3.52
22.4	490	0.99995677	0.92969173	0.99700349	21.3	1.1	4.74
21.6	530	0.99245842	0.84809642	0.99999992	22.3	-0.7	-3.27
31	570	0.98645157	0.98246374	0.97368597	29.6	1.4	4.45
15.1	471	0.99464019	0.66707293	0.98221853	16.4	-1.3	-8.82
15.3	562	0.99850704	0.66612754	0.99518898	14.3	1.0	6.38
19.1	558	0.99986999	0.78673254	0.9899583	17.4	1.7	9.11
21.8	414	0.99974834	0.98261197	0.99371029	23.1	-1.3	-5.80
30.7	497	0.9845102	0.9763522	0.99973068	29.7	1.0	3.24
28.3	531	0.99161494	0.97435796	0.85525631	29.9	-1.6	-5.51
26.3	431	0.9976372	0.88794314	0.87446944	24.1	2.2	8.32
24.6	545	0.99488453	0.92195016	0.91530112	25.4	-0.8	-3.21
24.8	384	0.9900777	0.86829347	0.98901524	24.3	0.5	2.21
21.9	547	0.99855308	0.96577187	0.99925619	23.0	-1.1	-4.95
16.9	460	0.99265468	0.64843147	0.99998156	16.4	0.5	3.15
17.3	567	0.99946112	0.87722399	0.99577443	20.1	-2.8	-15.94
25.5	546	0.99766209	0.99580891	0.99954678	24.3	1.2	4.84
23.3	461	0.99065211	0.85114425	0.99988655	23.2	0.1	0.32
20.6	461	0.97852742	0.62089059	0.99552182	22.1	-1.5	-7.43
9.6	504	0.99722991	0.51187456	0.99987066	10.3	-0.7	-7.05
7.5	545	0.9982979	0.40432426	0.99807657	6.7	0.8	10.93
20.7	499	0.95807162	0.2447818	0.97603438	20.9	-0.2	-1.14
10.5	542	0.9874684	0.32623924	0.99002468	9.5	1.0	9.15
7.4	560	0.99929031	0.47376981	0.99758911	8.3	-0.9	-11.79

Función de correlación neuronal

$P_asCode = Match(P, "P01", 0, "P02", 1, "P03", 2, "P04", 3, "P05", 4, "P06", 5, "P07", 6, "P08", 7);$

$$\mathbf{H1_1} = \text{Exp}(-0.5 * ((-0.621008981543945) + 0.000509687123154051 * L + 0.559785902003539 * \text{Prof.} + \text{Match}(\text{P_asCode}, 0, 0.026092085261603, 1, -0.058599938653582, 2, 0.0965633328047374, 3, -0.00332143684158177, 4, 0.0601525708360919, 5, 0.0752682078958909, 6, -0.0462288835336496, 7, -0.14992593776951)) ^ 2));$$

$$\mathbf{H1_2} = \text{Exp}(-0.5 * (1.0417025378114 + -0.00373768225309415 * L + 1.70851898040929 * \text{Prof.} + \text{Match}(\text{P_asCode}, 0, 0.146493849824071, 1, 0.593474286713754, 2, -0.332111675365981, 3, 0.031666999982802, 4, 0.241621089055517, 5, -0.117689812291165, 6, 0.974281420389242, 7, -1.53773615832372)) ^ 2));$$

$$\mathbf{H1_3} = \text{Exp}(-0.5 * (0.471685400130616 + -0.000261612445793293 * L + -0.337054315344161 * \text{Prof.} + \text{Match}(\text{P_asCode}, 0, -0.0637900078984604, 1, 0.0431945340302219, 2, -0.0488103131459421, 3, 0.361255679697542, 4, -0.0877738431605915, 5, -0.0965019602181688, 6, -0.121516101007057, 7, 0.0139420117024558)) ^ 2));$$

$$\mathbf{Predicted\ w\%} = 475.408806674571 + -457.448810945645 * \mathbf{H1_1} + 29.2975743954141 * \mathbf{H1_2} + -23.9502055322326 * \mathbf{H1_3};$$

Desviación estándar del *error* porcentual: 7.16 %

Desviación estándar de la diferencia de *humedad*: 1.26 %

Es decir, con este modelo de red neuronal el sensor predice la humedad con un rango de +/- 1.26 % en promedio, dependiendo del punto “P”, y la profundidad.

6.1.2. Predicción de la temperatura.

La predicción de la temperatura se ha realizado ajustando los resultados a la temperatura ambiente. Los resultados para cada pozo y cada altura se visualizan a continuación.

Para todas las figuras que siguen se tiene:

P: número de pozo en el cual se hace la medición.

L: lectura del sensor evidenciada en la pantalla LCD.

Prof.: Profundidad de la medición medida a partir de la superficie libre del terreno, hacia abajo.

Tabla 5

Temperatura medida con el sensor.

DATOS DE TRABAJO DE CAMPO - TUPAC AMARU					
P: N° DE PERFORACIONES	N°	L: LECTURA DEL SESOR DE TEMPERATURA (°C)	Prof: PROFUNDIDAD	HORA REGISTRADA	FECHAS DE REGISTRO
P01	1	15.9	0.4	8:30 a. m.	28/09/2023
	2	16.5	0.6	8:55 a. m.	
	3	17.3	0.8	9:30 a. m.	
P02	4	19.1	0.4	9:50 a. m.	
	5	20.4	0.6	10:30 a. m.	
	6	21.2	0.8	11:00 a. m.	
P03	7	21.8	0.4	11:30 a. m.	
	8	22.3	0.6	12:00 p. m.	
	9	22.7	0.8	12:30 p. m.	
P04	10	14.1	0.4	8:00 a. m.	29/09/2023
	11	14.9	0.6	8:30 a. m.	
	12	16.1	0.8	9:05 a. m.	
P05	13	17.8	0.4	9:35 a. m.	
	14	18.2	0.6	10:05 a. m.	
	15	19	0.8	10:40 a. m.	
P06	16	19.2	0.4	11:10 a. m.	
	17	19.7	0.6	11:45 a. m.	
	18	19.8	0.8	12:18 p. m.	
P07	19	18.25	0.4	9:10 a. m.	30/09/2023
	20	18.56	0.6	9:40 a. m.	
	21	19.2	0.8	10:10 a. m.	
P08	22	19.56	0.4	11:08 a. m.	
	23	19.7	0.6	11:42 a. m.	
	24	20.1	0.8	12:16 p. m.	

CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Siguiendo lo mencionado previamente y basándonos en lo abordado en cada capítulo, se derivan las siguientes conclusiones generales:

7.1. Conclusiones

- Se ha logrado diseñar los componentes del equipo electrónico con la finalidad de medir el contenido de humedad de auscultaciones de suelo a cualquier profundidad. El equipo electrónico propuesto consta de un sensor de humedad embebida en un casquillo metálico, que delimitan el volumen de suelo circundante a la sonda, consta además de un sistema de lectura de pantallas LCD que recibe la información procesada de tarjeta electrónica de tipo Arduino.
- Se han logrado implementar cuatro equipos electrónicos previamente diseñados, a través de la adquisición, adaptación, conexión y programación de los distintos componentes del sistema empaquetados en un único dispositivo transportable. Los tres primeros fueron prototipos descartados, a solicitud de uno de los revisores de la presente investigación, sin embargo, se aplicó lo aprendido para el diseño de la última versión.
- Se ha logrado evaluar el equipo electrónico haciendo mediciones en campo en ocho pozos de prospección a tres diferentes profundidades: 0.40 m, 0.60 m y 0.80 m, en este sentido se concluye que la capacidad de predicción de una función de red neuronal descrita previamente, misma que permite obtener un coeficiente de determinación de 0.96, el cual es considerado alto, que a su vez habilita para la predicción de la humedad con solo leer la lectura del sensor y tomando en cuenta el número de pozo en el cual se ha leído y la profundidad de inserción del sensor.
- Se ha logrado diseñar los componentes del equipo electrónico de temperatura con la finalidad de medir los diferentes cambios de temperatura ambiente.
- El diseño de un solo equipo de humedad y temperatura no se ha logrado debido a que los sensores alteraban las lecturas en la pantalla LCD, y por consiguiente se hizo el diseño e implementación como equipos separados, utilizando los mismos componentes como es el arduino, la pantalla LCD.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda el empleo del sistema de sensores propuesto por la presente investigación para el monitoreo del contenido de humedad en diversos estudios de ingeniería civil, en condiciones de campo similares a las estudiadas en esta tesis.
- Se recomienda, además, fomentar la investigación que incluya distintos campos del conocimiento humano, ya sean aplicados como la ingeniería civil o teóricos como la electrónica, con la finalidad de encontrar soluciones conjuntas y eficientes para los problemas de ingeniería tales como sensores de humedad, sensores de CBR y densidad entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- Alibaba.com. (23 de Enero de 2018). Soil Moisture Sensor, Soil Moisture Sensor Suppliers and Manufacturers at Alibaba.com. Obtenido de <https://www.alibaba.com/showroom/soil-moisture-sensor.html>
- Alsharif, A., Alsharif, A., Alsharif, A., & Alsharif, A. (2021). Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Irrigation System for Greenhouse Monitoring. *Sensors (Basel)*, 21(16), 5387.
- ARSA. (20 de Enero de 2018). QUALITY CONTROL OF CONSTRUCTION MATERIALS. Obtenido de <http://www.arsaengineers.com/quality-control-of-construction-materials.html>
- ASTM. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. West Conshohocken: ASTM.
- Belov, M. (2014). Measurement and sensor technologies trends, development dynamics and application scope. Autumn: Kajaani University of Applied Sciences.
- Bogena, Herbst, Huisman, Rosenbaum, Weuthen, & Vereecken. (2010). Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability. Madison: Soil Science Society of America.
- Carter, M., & Bentley, S. (2016). Soil properties and their correlations. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Casafont, C. (2017). SELECCIÓN Y DISEÑO DE SENSORES DE HUMEDAD PARA MINERIA BLOCK CAVING. Santiago: Universidad de Chile.
- Cimmino, M., D'Apuzzo, M., & D'Urso, G. (2020). Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Applications in Precision Agriculture. *Sensors (Basel)*, 20(12), 3585.
- Construmática. (01 de Febrero de 2018). Contenido de Humedad en Suelos Cohesivos. Obtenido de http://www.construmatica.com/construpedia/Contenido_de_Humedad_en_Suelos_Cohesivos

- Das, B. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- DHL. (2013). LOW-COST SENSOR TECHNOLOGY. Troisdorf: DHL Customer Solutions & Innovation.
- Encyclopædia Britannica. (21 de Enero de 2016). Measurement. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/measurement>
- FAO. (1 de Febrero de 2018). Definición de la consistencia del suelo. Obtenido de http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Head. (2006). Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1. Gasteshead: Whittels Publishing.
- Hernández, & Reyes. (2017). ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y DE REPRODUCIBILIDAD R&R. Ciudad de México: www.icicm.com.
- Hu, H., & Zheng, X. X. (2013). Experiment and Analysis on Influence of Moisture Content on the Mechanical Characteristics of Residual Soil of Granite. *Advanced Materials Research*, 790, 306–309. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.790.306>
- Huallpa Pucapuca, G. Y. (2021). Diseño de un sensor para la determinación del contenido de la humedad in-situ como parte de control de calidad en la construcción de pavimentos en el distrito de Checacupe, Canchis, Cusco, 2021. Universidad César Vallejo. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3189952>
- IAEA. (2008). Field Estimation of Soil Water Content. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Ideam. (Febrero de 1 de 2018). MEDICION DE LA HUMEDAD DEL SUELO. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/012406/Cap15.pdf>

- Johnson, G., & Clyne, T. (2020). Capacitance Type Moisture Sensors in Unbound Granular Materials at MnROAD Research Facility. In *Advanced Methods of Continuum Mechanics for Materials and Structures* (pp. 689–699). Springer.
- Johnson. (1992). *Methods of Measuring Soil Moisture in the Field*. Denver: U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR.
- Kargas, G., & Soulis, K. X. (2012). Performance Analysis and Calibration of a New Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(7), 632–641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000449](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000449)
- Lakshmi. (2015). Quality Control and Quality Assurance In Building Construction. National Conference on Research Advances in Communication, Computation, Electrical Science and Structures, 29-37.
- Lambe, W., & Whitman, R. (2004). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Lucas, J. (5 de Febrero de 2018). Electricity Basics: Resistance, Inductance & Capacitance. Obtenido de <https://www.livescience.com/53875-resistors-capacitors-inductors.html>
- LLORVESA. (23 de Enero de 2018). VENTILADORES DE TIRO FORZADO O INDUCIDO. Obtenido de http://www.llorvesa.com/es/ventiladores-de-tiro-forzado-o-inducido_c191696/
- Mamani Mamani, H., & Paz Guillen, S. (2022). Control de humedad en suelos heterogéneos de infraestructura vial aplicando sensor capacitivo, Cusco, 2021. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/93112>
- Marino, P., Quintero, D. C. R., Santonastaso, G. F., & Greco, R. (2023). Prototype of an IoT-Based Low-Cost Sensor Network for the Hydrological Monitoring of Landslide-Prone Areas. *SENSORS*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/s23042299>
- Measuring Soil Moisture with ADCs - Circuit Cellar. (n.d.). Retrieved October 23, 2023, from <https://circuitcellar.com/research-design-hub/measuring-soil-moisture-with-adcs/>
- Measuring water in soil - capacitance - Department of Environment,.... (n.d.). Retrieved October 23, 2023, from

<https://www.landscape.sa.gov.au/mr/publications/measuring-water-in-soil-capacitance>

- Mohamed, I. (2015). STUDY ON THE IMPACT OF MOISTURE CONTENT ON SUBGRADE STRENGTH. 5th International Symposium 2015 – IntSym 2015 SEUSL, 71-76.
- Montgomery, D. (2009). Introduction to Statistical Quality Control . Jefferson City: John Wiley & Sons.
- MTC. (2000). MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO. Lima: MTC.
- MTC. (2015). TARIFAS DE ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA DIRECCIÓN DE ESTUDIOS ESPECIALES AÑO 2015. Lima: MTC.
- Mukhlisin, M., Astuti, H. W., Wardihani, E. D., & Matlan, S. J. (2021). Techniques for ground-based soil moisture measurement: a detailed overview. *Arabian Journal of Geosciences* 2021 14:19, 14(19), 1–34. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-08263-0>
- Nobahar, M., Salunke, R., Khan, M. S., & Amini, F. (2022). Development of Soil Moisture Content and Soil Matric Suction Model Based on Field Instrumentation and Electrical Resistivity Imaging (ERI) for Highway Slopes Constructed on High Expansive Clay Soil. *Geotechnics* 2022, Vol. 2, Pages 671-705, 2(3), 671–705. <https://doi.org/10.3390/GEOTECHNICS2030033>
- Palomino Vásquez, E. (2021). Análisis correlacional de resistividad y capacitancia con contenido de humedad en arcilla, arena y material base de pavimento, Cusco 2021. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/80395>
- Payero, J. O., Mirzakhani-Nafchi, A., Khalilian, A., Qiao, X., Davis, R., Payero, J. O., Mirzakhani-Nafchi, A., Khalilian, A., Qiao, X., & Davis, R. (2017). Development of a Low-Cost Internet-of-Things (IoT) System for Monitoring Soil Water Potential Using Watermark 200SS Sensors. *Advances in Internet of Things*, 7(3), 71–86. <https://doi.org/10.4236/AIT.2017.73005>
- Protimeter. (2014). Moisture testers for soils, sands, powders, aggregates, concrete and masonry. Protimeter.

- Quil, C. (2009). Estimación del módulo de elasticidad por medio de la velocidad de propagación del sonido en madera de Aromo australiano. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Rasch, S. (2011). DETERMINING THE RELATIVE EFFECTS OF VOLUMETRIC WATER CONTENT AND DRY DENSITY ON THE DIELECTRIC CONSTANT OF SOILS. Columbia: University of Missouri.
- Rodríguez, M. (20 de Enero de 2018). Diferencia entre sensor, transductor y captador. Obtenido de <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/diferencia-sensor-transductor-captador/>
- Rojas, A., Zúñiga, O., Sánchez de Prager, M., Pérez, J., & Gascó, M. (2007). Conductividad térmica del suelo, materia orgánica, actividad y biomasa microbianas en sistemas de cultivo de maracuyá en Toro, Valle del Cauca. Cauca.
- Salour, F. (2015). Moisture Influence on Structural Behaviour of Pavements. Stockholm: KTH, Royal Institute of Technology.
- Schwamback, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy. *Sensors*, 23(5). <https://doi.org/10.3390/s23052451>
- Sebesta, S., Oh, J., Lee, S. I., Sanchez, M., & Taylor, R. (2013). INITIAL REVIEW OF RAPID MOISTURE MEASUREMENT FOR ROADWAY BASE AND SUBGRADE. Texas: TEXAS A&M TRANSPORTATION INSTITUTE.
- Serna, J. (2015). EVALUACIÓN DEL MÉTODO ACTIVO PARA DETERMINAR CONTENIDOS DE HUMEDAD EN SUELOS. Santiago de Chile: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.
- Sotelo, M., Mazari, M., Garibay, J., & Nazarian, S. (2014). Variability of Moisture Content Measurement Devices on Subgrade Soils. *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, GSP 234 © ASCE 2014, 1425-1432.
- Tal, E. (21 de Setiembre de 2017). The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Obtenido de Measurement in Science: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/measurement-science>

Torres, F. (2010). MÉTODO ACÚSTICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA POROSIDAD TOTAL EN DIVERSOS SUELOS. Valdivia: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

Tripathy, & Anuradha. (2018). INTERNET OF THINGS (IoT) Technologies, Applications, Challenges, and Solutions. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

UNI. (06 de Febrero de 2017). TARIFA DE ENSAYOS DE LABORATORIO. Obtenido de <http://www.lms.uni.edu.pe/labsuelos/tarifa/tarifa%20ensayos.pdf>

Universidad Javeriana. (20 de Febrero de 2017). LISTADO DE PRECIOS 2017. Obtenido de <http://ingenieria.javeriana.edu.co/documents/7508381/0/Lista+de+Precios+la+boratorios+2017.pdf/f142d779-8719-4ec1-b869-c6de07ee3097>

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico de trabajos de campo y laboratorio

Perforado de suelo



Extracción de muestra



Instalación de equipo



Colocado de equipo



Fundamento del sensor: correlación de la humedad con la resistividad.

Causa de su eliminación: sugerencia de uno de los revisores de la tesis.

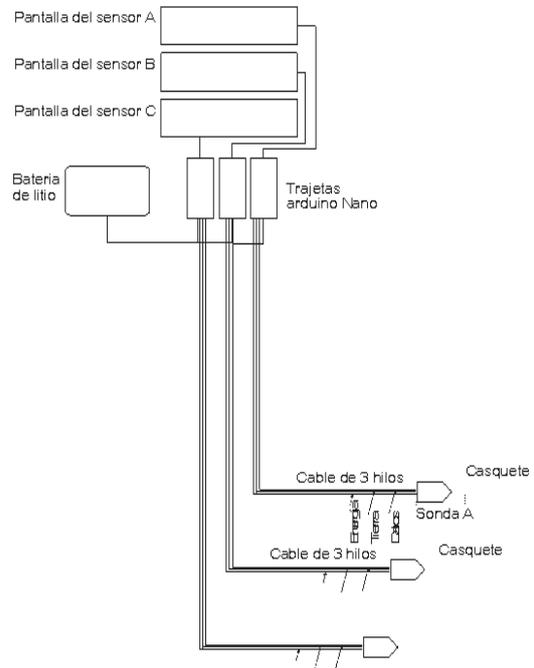
Panel fotográfico de trabajos de campo y laboratorio

Instalación del primer equipo

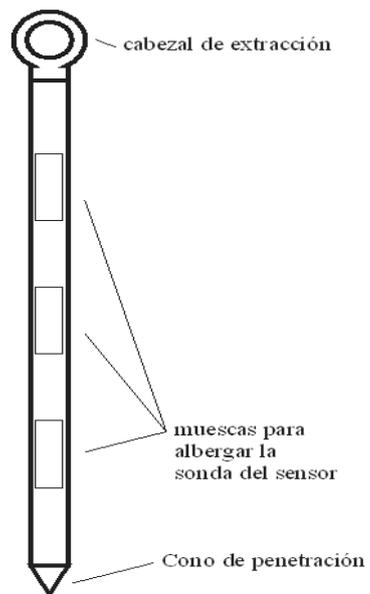


Segundo equipo elaborado

Diseño del primer equipo



Diseño del segundo equipo

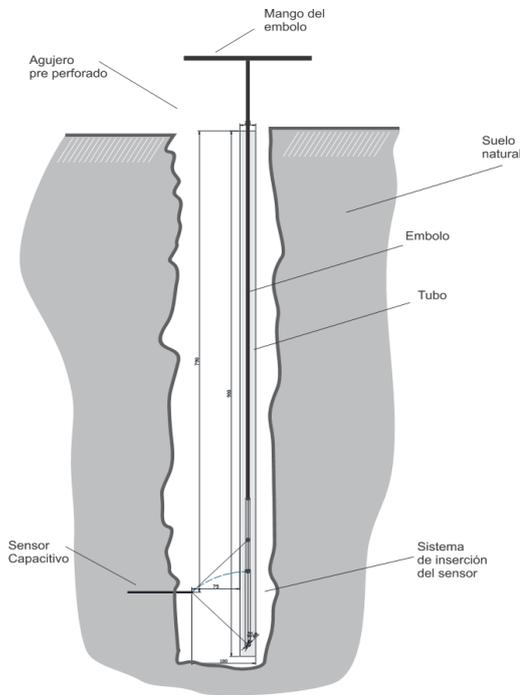


Fundamento del sensor: correlación de la humedad con la resistividad.

Causa de su eliminación: sugerencia de uno de los revisores de la tesis.

Panel fotográfico de trabajos de campo y laboratorio

Diseño del tercer equipo



Tercer equipo elaborado



Herramientas para realizar el ensayo



Cuarto equipo elaborado

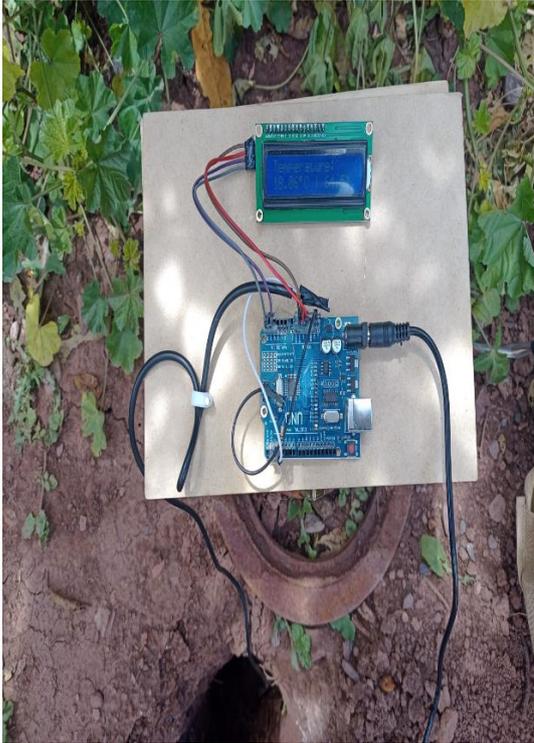


Fundamento del sensor: correlación de la humedad con la resistividad.

Panel fotográfico de trabajos de campo y laboratorio

Lectura de temperatura

Trabajo de campo

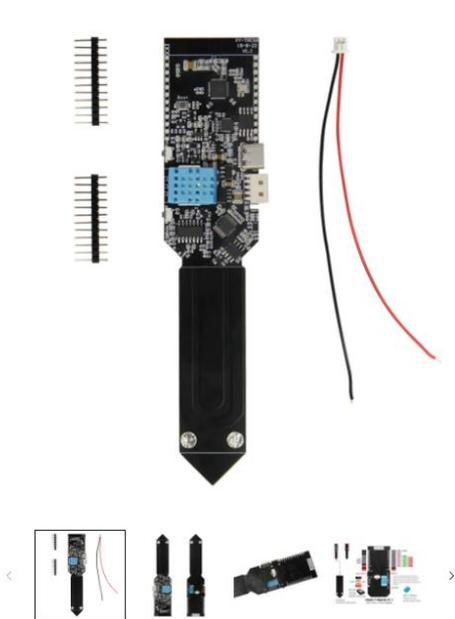


Equipo de lectura de temperatura

Cuarto equipo elaborado



Anexo 2. Especificaciones de fábrica del sensor



Before 5 days



After 5 days

Specifications

MCU	ESP32
FLASH	4MB
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Xtensa dual-core 32-bit LX6 microprocessor	
Bluetooth	BLE V4.2
Onboard	Reset Button + Custom Button IO35 + ABS material shell + Jst 2pin 1.25mm connector
Version Optional	DHT11/ BME280 Version
Digital 16bit Ambient Light Sensor	SDA: IO25; SCL: IO26
IC Name	BH1750
Interface	I2C bus
Wide range and High resolution(1 - 65535 lx) 50Hz/ 60Hz Light noise reject-function	

Anexo 3. Norma referida a la humedad

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: D2216 – 19

Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass¹

This standard is issued under the fixed designation D2216; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the laboratory determination of the water (moisture) content by mass of soil, rock, and similar materials where the reduction in mass by drying is due to loss of water except as noted in 1.4, 1.5, and 1.8. For simplicity, the word “material” shall refer to soil, rock or aggregate whichever is most applicable.

1.2 Some disciplines, such as soil science, need to determine water content on the basis of volume. Such determinations are beyond the scope of this test method.

1.3 The water content of a material is the ratio of the mass of water contained in the pore spaces of soil or rock material, to the solid mass of particles, expressed as a percentage.

1.4 The term “solid material” as used in geotechnical engineering is typically assumed to mean naturally occurring mineral particles of soil and rock that are not readily soluble in water. Therefore, the water content of materials containing extraneous matter (such as cement etc.) may require special treatment or a qualified definition of water content. In addition, some organic materials may be decomposed by oven drying at the standard drying temperature for this method ($110 \pm 5^\circ\text{C}$). Materials containing gypsum (calcium sulfate dihydrate) or other compounds having significant amounts of hydrated water, may present a special problem as this material slowly dehydrates at the standard drying temperature ($110 \pm 5^\circ\text{C}$) and at very low relative humidity, forming a compound (such as calcium sulfate hemihydrate) that is not normally present in natural materials except in some desert soils. In order to reduce the degree of dehydration of gypsum in those materials containing gypsum or to reduce decomposition in highly/fibrous organic soils, it may be desirable to dry the materials at 60°C or in a desiccator at room temperature. When a drying temperature is used which is different from the standard drying

temperature as defined by this test method, the resulting water content may be different from the standard water content determined at the standard drying temperature of $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

NOTE 1—Test Method D2974 provides an alternate procedure for determining water content of peat materials.

1.5 Materials containing water with substantial amounts of soluble solids (such as salt in the case of marine sediments) when tested by this method will give a mass of solids that includes the previously soluble dissolved solids. These materials require special treatment to remove or account for the presence of precipitated solids in the dry mass of the specimen, or a qualified definition of water content must be used. For example, see Test Method D4542 regarding information on marine sediments.

1.6 This test standard requires several hours for proper drying of the water content specimen. Test Methods D4643, D4944 and D4959 provide less time-consuming processes for determining water content. See Gilbert² for details on the background of Test Method D4643.

1.7 Two test methods are provided in this standard. The methods differ in the significant digits reported and the size of the specimen (mass) required. The method to be used may be specified by the requesting authority; otherwise Method A shall be performed.

1.7.1 *Method A*—The water content by mass is recorded to the nearest 1 %. For cases of dispute, Method A is the referee method.

1.7.2 *Method B*—The water content by mass is recorded to the nearest 0.1 %.

1.8 This standard requires the drying of material in an oven. If the material being dried is contaminated with certain chemicals that may react violently or emit hazardous gases when heated, health and safety hazards may exist. Therefore, this standard should not be used in determining the water content of contaminated soils unless adequate health and safety precautions are exercised.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D18 on Soil and Rock and is the direct responsibility of Subcommittee D18.03 on Texture, Plasticity and Density Characteristics of Soils.

Current edition approved March 1, 2019. Published March 2019. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 2010 as D2216-10. DOI: 10.1520/D2216-19.

² Gilbert, P.A., “Computer Controlled Microwave Oven System for Rapid Water Content Determination.” Tech. Report GL-88-21. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MS, November 1988.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States

Anexo 4. Detalles adicionales del equipo

