



Universidad  
Nacional  
de Loja

**Universidad Nacional de Loja**

**Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables**

**Carrera de Ingeniería Agrícola**

**Evaluación de sensores de humedad de suelo de bajo costo  
con fines de aplicación al riego eficiente.**

Trabajo de Integración Curricular  
previo a la obtención del título de  
Ingeniero Agrícola

**AUTOR:**

Wilson Josue Giron Erazo

**DIRECTOR:**

Ing. Diego Fernando Chamba Zaragocín, PhD.

Loja – Ecuador

2023

## Certificación

Loja, 24 de febrero de 2023

Ing. Diego Fernando Chamba Zaragocín, PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Evaluación de sensores de humedad de suelo de bajo costo con fines de aplicación al riego eficiente.**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Agrícola**, de la autoría de la estudiante **Wilson Josue Giron Erazo**, con **cédula de identidad Nro.0750180846**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Ing. Diego Fernando Chamba Zaragocín, PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

### **Autoría**

Yo, **Wilson Josue Giron Erazo**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



**Firma:**

**Cédula de identidad:** 0750180846

**Fecha:** 06 de julio del 2023

**Correo electrónico:** wilson.giron@unl.edu.ec

**Teléfono celular:** 0963732067

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.**

Yo, **Wilson Josue Giron Erazo**, declaro ser autor del Trabajo Integrado Curricular titulada: **Evaluación de sensores de humedad de suelo de bajo costo con fines de aplicación al riego eficiente**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Agrícola**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los seis días del mes de julio de dos mil veintitrés.



**Firma:**

**Autor:** Wilson Josue Giron Erazo

**Cédula:** 0750180846

**Dirección:** Esteban Godoy, Loja Ecuador

**Correo electrónico:** wilson.giron@unl.edu.ec

**Teléfono celular:** 0963732064

**DATOS COPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Integración Curricular:** Ing. Diego Fernando Chamba Zaragocín, PhD.

## **Dedicatoria**

El presente proyecto de investigación está dedicado principalmente a mis padres, Rosa y Wilzon, quienes son mi principal motivación para alcanzar este objetivo. Gracias a su esfuerzo y apoyo constante e incondicional, me han inculcado sabiduría, valores y amor para afrontar las situaciones difíciles de la mejor manera. Han sido fundamentales en mi crecimiento personal y me han ayudado a convertirme en la persona que soy hoy, con principios, valores y perseverancia.

A mis hermanas, Mitzi y Gabriela, por ser un apoyo incondicional en esta etapa de mi vida universitaria. Han estado presentes en momentos difíciles de nuestra familia y su respaldo ha sido invaluable.

También quiero expresar dedicar a mis tíos, German, Klever, Darwin, a mi tía Yody y a mi prima Yessica. Sus consejos y apoyo han sido determinantes en mi camino hacia el logro de este objetivo.

A mis compañeros de clase, quienes han brindado un apoyo constante, quiero agradecerles por acompañarme en este proceso y perseverar juntos en nuestra vida universitaria.

Asimismo, quiero dedicar este trabajo a los docentes que me han impartido conocimientos y compartido sus experiencias a lo largo de mi carrera universitaria. Su apoyo y conocimiento han sido fundamentales para enfrentar los desafíos que la vida profesional en el campo agrícola traerá consigo. A través de su enseñanza, estoy preparado para enfrentar los problemas de la sociedad y contribuir al ámbito agrícola, garantizando y mejorando la calidad de vida en nuestra provincia y país.

***Wilson Josue Giron Erazo***

## **Agradecimiento**

Primero, quiero agradecer sinceramente a mi director de proyecto, el Ing. Diego Fernando Chamba Zaragocín, Ph.D., por brindarme esta oportunidad y por su constante consejo, apoyo y asesoramiento en la elaboración de este proyecto. Su conocimiento y confianza han sido fundamentales para lograr un trabajo de calidad. También quiero agradecer a Santiago Nole por ser un asesor en este proyecto y por su ayuda en el proceso de finalización.

Agradezco a mis amigos y amigas por el apoyo que me han brindado y por los momentos que hemos compartido durante este periodo de mi vida, tanto personal como académico, en el transcurso de mi carrera universitaria.

Quiero expresar un profundo agradecimiento a mis padres, Rosa y Wilzon, quienes han sido pilares fundamentales y han hecho todo lo posible para que pudiera estudiar esta prestigiosa carrera. Ellos son mi modelo de perseverancia, honestidad, tenacidad y humildad en su vida diaria. También agradezco a mis hermanas por el apoyo moral que me han brindado.

Por último, quiero agradecer a esta prestigiosa universidad por permitirme formar parte de su comunidad estudiantil y a la carrera de Ingeniería Agrícola por educarme en sus distintas áreas.

***Wilson Josue Giron Erazo***

## Índice de contenidos

Portada .....	i
Certificación .....	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización .....	iv
Dedicatoria .....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenidos .....	vii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xii
Índice de anexos .....	xiv
1. Título.....	1
2. Resumen .....	2
2.1. Abstract .....	3
3. Introducción.....	4
4. Marco teórico .....	7
4.1. Antecedentes .....	7
4.2. Propiedades del suelo .....	8
4.2.1. <i>Propiedades físicas del suelo</i> .....	8
4.2.1.1. Color.....	8
4.2.1.2. Textura.....	8
4.2.1.3. Estructura.....	9
4.2.1.4. Contenido de humedad en el suelo.....	9
4.2.1.4.1. <i>Capacidad De Campo</i> .....	9
4.2.1.4.2. <i>Punto de Marchitez Permanente</i> .....	9
4.2.1.4.3. <i>Agua Disponible</i> .....	10
4.2.1.4.4. <i>Capacidad de Aireación</i> .....	10

4.2.1.4.5. Saturación.....	10
4.2.2. Movimiento de agua en el suelo.....	10
4.3. Instrumento para determinar la humedad del suelo.....	10
4.3.1. Tensiómetro .....	11
4.3.2. La Sonda De Neutrones .....	11
4.3.3. Sondas TDR (Time Domain Reflectometry).....	11
4.3.4. Sensores que miden la constante dieléctrica del suelo .....	11
4.4. Evaluación de los sensores. ....	12
4.5. Componentes de un módulo del sensor .....	12
4.5.1. Arduino .....	12
4.5.2. Microprocesador Esp 32.....	12
4.5.3. Sensor de humedad Fc-28.....	13
4.5.4. Protoboard. ....	13
4.5.5. Pantalla LCD. ....	14
4.5.6. Relé 5 voltios con dos canales .....	14
5. Metodología.....	15
5.1. Ubicación del proyecto.....	15
5.2. Materiales .....	15
5.2.1. Materiales de gabinete.....	15
5.2.2. Materiales para la construcción de los sensores para humedad.....	16
5.2.3. Sustratos para la evaluación del contenido de humedad.....	16
5.3. Métodos .....	16
5.4. Variables para la medición de los sensores .....	16
5.5. Metodología para los objetivos.....	17
5.5.1. Metodología del objetivo uno .....	17
5.5.1.1. Prototipo uno de sensor de humedad.....	17
5.5.1.2. Prototipo dos de sensor de humedad del suelo. ....	18



5.5.1.3. Prototipo tres de sensor de humedad.....	19
5.5.2. Metodología de segundo objetivo.....	19
5.5.2.1. Diseño del módulo de los sensores de humedad del suelo: propuestos, sensores comerciales; sensor ambiental DHT-11 y pantalla LCD.....	19
5.5.2.2. Elaboración del código para el funcionamiento del módulo. ....	20
5.5.2.2.1. Elaboración del código para las lecturas del sensor de humedad.....	20
5.5.2.3. Calibración de la pantalla LCD. ....	21
5.5.2.3.1. Sensor DTH-11 para humedad y temperatura ambiente.....	21
5.5.2.3.2. Parámetros para transformar el código de los sensores de humedad en datos. ....	23
5.5.2.4. Pruebas del módulo sensor. ....	23
5.5.2.4.1. Secado del suelo.....	23
5.5.2.4.2. Llenado y pesado de las macetas.....	24
5.5.2.4.3. Cantidad de agua para aplicar al suelo. ....	24
5.5.3. Metodología objetivo 3.....	25
6. Resultados .....	26
6.1. Diseño y construcción prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo .....	26
6.2. Pruebas y calibración para el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos .....	27
6.2.1. Prueba de los sensores.....	28
6.2.1.1. Prueba de los sensores en suelos Franco .....	29
6.2.1.2. Prueba de los sensores en suelo Salino .....	31
6.2.1.3. Prueba de los sensores en suelo orgánico .....	33
6.2.1.4. Prueba de los sensores en suelo limoso.....	35
6.2.1.5. Prueba de los sensores en suelo arcilloso.....	36
6.2.1.6. Prueba de los sensores en suelo arenoso.....	38

6.2.1.7. Comparación y validación de los datos obtenidos de sensores de temperatura y humedad ambiente con un hidrotermometro. ....	40
6.3. Validación los datos recogidos para programación de los sensores mediante la transmisión de los datos a través de una Raspberry Pi o Arduino.....	42
7. Discusiones .....	44
7.1. Diseño y construcción prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo .....	44
7.2. Probar y calibrar el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos.....	46
7.3. Validación los datos recogidos para programación de los sensores mediante la transmisión de los datos a través de una Raspberry Pi o Arduino.....	48
8. Conclusiones.....	50
9. Recomendaciones.....	52
10. Bibliografía.....	54
11. Anexo .....	63

## **Índice de tablas.**

<b>Tabla 1.</b> Tipo de suelo para probar los sensores.....	<b>16</b>
<b>Tabla 2.</b> Código de los sensores de humedad del suelo.....	<b>20</b>
<b>Tabla 3.</b> Código de pantalla LCD .....	<b>21</b>
<b>Tabla 4.</b> Código de funcionamiento del sensor DHT-11 .....	<b>22</b>
<b>Tabla 6.</b> Cantidad de agua aplicar por cada porcentaje .....	<b>24</b>
<b>Tabla 7.</b> Características de los prototipos de sensores.....	<b>26</b>

## Índice de figuras.

<b>Figura 1.</b>	Microcontrolador Esp-32. ....	13
<b>Figura 2.</b>	Sensor de humedad del suelo Fc-28. ....	13
<b>Figura 3.</b>	Protoboard. ....	14
<b>Figura 4.</b>	Pantalla LCD. ....	14
<b>Figura 5.</b>	Relé 5V de dos canales. ....	14
<b>Figura 6.</b>	Lugar de estudio. ....	15
<b>Figura 7.</b>	Diseño del prototipo uno de sensor de humedad del suelo. ....	17
<b>Figura 9.</b>	Diseño del prototipo dos de sensor de humedad del suelo. ....	18
<b>Figura 8.</b>	Diseño del prototipo tres de sensor de humedad del suelo. ....	19
<b>Figura 10.</b>	Módulo de los prototipos de sensores de humedad, sensores Fc-28, DHT11. .....	20
<b>Figura 11.</b>	Escala para interpretación de la humedad dada por el sensor Fc-28. ....	23
<b>Figura 12.</b>	Secado de los diferentes suelos. ....	23
<b>Figura 13.</b>	Pesado de las macetas y macetas con cada tipo de suelo. ....	24
<b>Figura 14.</b>	Prototipos propuesto. ....	27
<b>Figura 15.</b>	Probando de conexión y funcionamiento de los prototipos de los sensores. .....	27
<b>Figura 16.</b>	Diagrama de flujo del código de programación. ....	28
<b>Figura 17.</b>	Agregado de agua para las lecturas. ....	28
<b>Figura 18.</b>	Prueba de los sensores. ....	29
<b>Figura 19.</b>	Curva de calibración de sensores en suelos francos de forma ascendente. .	29
<b>Figura 20.</b>	Curva de contenido de humedad franco de forma descendente. ....	30
<b>Figura 21.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores para suelo franco. ....	31
<b>Figura 22.</b>	Curva de calibración de los sensores para suelo salinos de forma ascendente. ....	31
<b>Figura 23.</b>	Curva de calibración de los sensores para suelo salinos de forma descendente. ....	32
<b>Figura 24.</b>	Histéresis ascendente de los prototipos en suelos salinos. ....	33
<b>Figura 25.</b>	Curva de calibración de sensores para suelos orgánicos. ....	33
<b>Figura 26.</b>	Curva de calibración de los sensores para suelo orgánico de forma descendente. ....	34
<b>Figura 27.</b>	Histéresis acendente de los prototipos en suelo orgánico. ....	34

<b>Figura 28.</b> Curva de calibración de sensores para suelos limoso .....	<b>35</b>
<b>Figura 29.</b> Curva de calibración de los sensores para suelo limoso de forma descendente.....	<b>36</b>
<b>Figura 30.</b> Histéresis ascendente de los prototipos en suelo limoso. ....	<b>36</b>
<b>Figura 31.</b> Curva de calibración para suelos arcilloso de forma ascendente.....	<b>37</b>
<b>Figura 32.</b> Curva de calibración de los sensores para suelo arcilloso de forma descendente.....	<b>37</b>
<b>Figura 33.</b> Histéresis ascendente de los prototipos en suelo arcilloso.....	<b>38</b>
<b>Figura 34.</b> Curva de calibración para sensores en suelos arenosos .....	<b>38</b>
<b>Figura 35.</b> Curva de contenido de humedad de suelo arenoso de forma descendente .	<b>39</b>
<b>Figura 36.</b> Histéresis ascendente de los prototipos para suelo arenoso .....	<b>39</b>
<b>Figura 37.</b> Temperatura (°C) del ambiente cuando estaba secando el suelo .....	<b>40</b>
<b>Figura 38.</b> Humedad relativa (%) del ambiente cuando estaba secando el suelo.....	<b>41</b>
<b>Figura 39.</b> Tipos de suelos agregados en la web. ....	<b>42</b>
<b>Figura 40.</b> Sensores de humedad en el aplicativo.....	<b>42</b>
<b>Figura 41.</b> Diagrama del código dos para el funcionamiento en el aplicativo. ....	<b>43</b>
<b>Figura 42.</b> Sensores de humedad en la plataforma “Sistema de Riego UNL” .....	<b>43</b>

## Índice de anexos

<b>Anexos 1.</b>	Parte del circuito eléctrico de prototipos de los sensores.....	<b>63</b>
<b>Anexos 2.</b>	Costo de la construcción de los prototipos de sensores. ....	<b>64</b>
<b>Anexos 3.</b>	Parte de código para probar los sensores. ....	<b>66</b>
<b>Anexos 4.</b>	Prueba de los sensores en suelos francos. ....	<b>67</b>
<b>Anexos 5.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos francos. ....	<b>67</b>
<b>Anexos 6.</b>	Prueba de los sensores en suelos salino. ....	<b>68</b>
<b>Anexos 7.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos francos. ....	<b>68</b>
<b>Anexos 8.</b>	Prueba de los sensores en suelos orgánicos. ....	<b>69</b>
<b>Anexos 9.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos orgánicos.....	<b>69</b>
<b>Anexos 10.</b>	Prueba de los sensores en suelos arcilloso.....	<b>70</b>
<b>Anexos 11.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos arcilloso. ....	<b>70</b>
<b>Anexos 12.</b>	Prueba de sensores en suelos limoso.....	<b>71</b>
<b>Anexos 13.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos arenoso. ....	<b>71</b>
<b>Anexos 14.</b>	Prueba de sensores en suelos arenosos. ....	<b>72</b>
<b>Anexos 15.</b>	Histéresis de los prototipos de sensores en suelos limoso. ....	<b>72</b>
<b>Anexos 16.</b>	Parte del código para el funcionamiento de los sensores en el aplicativo. ....	<b>73</b>
<b>Anexos 17.</b>	Manual de funcionamiento de la página web “Riego UNL”. ....	<b>74</b>
<b>Anexos 18.</b>	Certificado del inglés del Abstract.....	<b>84</b>

## **1. Título**

Evaluación de sensores de humedad de suelo de bajo costo con fines de aplicación al riego eficiente.

## 2. Resumen

Los sensores de humedad del suelo desempeñan un papel fundamental en la optimización del riego y la prevención del desperdicio de agua en la agricultura. Los sensores de bajo costo presentan una ventaja económica significativa en comparación con los sensores comerciales de marcas reconocidas, al tiempo que brindan mediciones precisas. Esta investigación se centra en el desarrollo de sensores asequibles para determinar la humedad del suelo mediante el diseño y construcción, pruebas y calibración de los dispositivos, así como la validación de los datos mediante la creación de códigos para la transmisión remota a través de una aplicación web. Para ello. Se diseñaron y construyeron tres prototipos de sensores basados en sondas y circuitos eléctricos con diferentes componentes. Para calibrar y validar las medidas, se realizaron pruebas en seis tipos representativos de suelos arcilloso, arenoso, limoso, orgánico, salino y franco, aplicando diferentes niveles de agua. Se desarrollaron dos códigos de programación para la lectura manual y la transmisión remota de al aplicativo web (Sistemas de Riego UNL). Finalmente se validó y comparó la precisión de los prototipos con un sensor comercial (Fc-28) mediante una curva de calibración. Los resultados obtenidos demostraron que el primer prototipo tuvo un rendimiento destacado en suelos salinos, francos y orgánicos, mostrando una alta conversión promedio y una notable precisión en estas condiciones. El segundo prototipo especialmente resulto efectivo en suelos arenosos, arcillosos y limosos, presentando una alta precisión en estas condiciones. Por otro lado, el tercer prototipo se obtuvo como un detector básico de humedad sin generar datos específicos. La curva de calibración del segundo prototipo obtuvo resultados óptimos (con un  $R^2 = 0.95$ ), equiparándose a la precisión del sensor comercial ( $R^2 = 0.96$ ) utilizado como referencia. En conclusión, se ha demostrado la viabilidad y eficacia de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en diferentes tipos de suelos, lo que se traduce en una mejora en la gestión del riego, la reducción del uso inadecuado del agua y el aumento de la producción agrícola en regiones con recursos económicos limitados y escasez de agua. Los resultados obtenidos obtuvieron una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la agricultura y la gestión del agua en el suelo.

**Palabras clave:** Sensores de humedad bajo costo, riego eficiente, prototipo, calibración de sensores, humedad de suelo, agricultura de precisión



## 2.1. Abstract

Soil moisture sensors play a fundamental role in optimizing irrigation and preventing water waste in agriculture. Low-cost sensors have a significant economic advantage compared to commercial sensors from well-known brands, while providing accurate measurements. This research focuses on developing affordable sensors to determine soil moisture by designing and building, testing and calibrating devices, as well as validating data by creating codes for remote transmission through a web application. To this end, it was designed and built three prototypes of sensors based on probes and electrical circuits with different components. To calibrate and validate the measurements, tests were performed on six representative samples of clay, sandy, silty, organic, saline and loam soils, applying different levels of water on them. Two programming codes were developed for manual reading and remote transmission of the web application (UNL irrigation systems).

Finally, the accuracy of the prototypes was validated and compared with a commercial sensor (Fc-28) using a calibration curve. The results obtained showed that the first prototype had an outstanding performance in saline, loamy and organic soils, showing a high average conversion and remarkable precision under these conditions. The second prototype was especially effective on sandy, clay and silty soils, presenting high precision under these conditions. On the other hand, the third prototype was obtained as a basic moisture detector without generating specific data. The calibration curve, which was the second prototype, obtained optimal results (with an  $R^2 = 0.95$ ), matching the precision of the commercial sensor ( $R^2 = 0.96$ ) used as a reference. In conclusion, the viability and effectiveness of low-cost soil moisture sensors has been demonstrated in different types of soils, which translates into improved irrigation management, a reduction in inappropriate water use and an increase in agricultural production in regions with limited economic resources and water scarcity.

The results obtained, showed a solid basis for future research and practical applications in the field of agriculture and soil water management.

**Keywords:** Low-cost moisture sensors, efficient irrigation, prototype, sensor calibration, soil moisture, precision agriculture

### 3. Introducción

El agua es un recurso vital para la agricultura, y se estima que aproximadamente el 70% del agua extraída a nivel mundial se destina a actividades agrícolas (Banco Mundial, 2017). Con una extensión de 1500 millones de hectáreas dedicada a la agricultura en todo el mundo, lo que representa el 11% de la superficie terrestre (FAO, 1997), el riego se ha vuelto esencial para garantizar la producción de alimentos. De estas áreas agrícolas, alrededor de 330 millones de hectáreas están equipadas con sistemas de riego, los cuales contribuyen con el 40% de la producción mundial de alimentos (Banco Mundial, 2017). A pesar de que la irrigación agrícola solo representa aproximadamente el 10% del agua utilizada en general, sigue siendo la actividad con mayor demanda de agua dulce en el planeta (Silva et al., 2008).

El riego de los cultivos se realiza mediante la precipitación natural y el riego artificial, pero no toda el agua aplicada es aprovechada eficientemente por las plantas (Muñoz, 2009). Existen diferentes formas de pérdida de agua en los cultivos, como la escorrentía superficial, la evaporación del suelo y la escorrentía subsuperficial (Demin, 2014). Además, Fuentes (1991) menciona que la evaporación provocada por el aumento de la temperatura en los sistemas de riego puede generar una escasez de agua en el suelo.

El cambio climático ha agravado la escasez de agua, lo que representa un desafío adicional para los agricultores y la producción de alimentos (CEPAL, 2011). En este contexto, se promueve el uso eficiente del agua a través de sistemas de riego localizado, que permiten una aplicación precisa del agua en las raíces de las plantas sin desperdiciarla en toda la superficie del suelo (Chamba, 2020). Sin embargo, en muchos casos, los métodos de riego no funcionan de manera óptima debido a un manejo inadecuado, lo que resulta en un uso ineficiente del agua. Esto puede atribuirse a la falta de conocimiento sobre las necesidades de humedad del suelo de los cultivos, lo que lleva a la aplicación excesiva de agua debido a un sistema de riego sobredimensionado.

La determinación precisa de la humedad del suelo es fundamental para evitar la saturación del mismo. La saturación ocurre cuando se aplica un riego excesivo o cuando el suelo ya tiene un alto contenido de humedad y se continúa regando. Esta situación puede tener un impacto negativo en las propiedades físicas y químicas del suelo, como la falta de oxigenación y el impedimento del crecimiento de las raíces de las plantas (Sánchez, 2011). Además, el exceso de agua puede provocar la salinización del suelo debido a la acumulación de sales presentes tanto en el suelo como en el agua de riego. Esto afecta la permeabilidad del suelo, el intercambio de nutrientes y puede causar toxicidad en las plantas (Liotta et al., 2015).

Estimar y conocer el contenido de la humedad del suelo son de gran importancia tanto para la investigación como para el manejo adecuado del riego (Segovia-Cardozo, 2022). Esto permitirá minimizar las pérdidas de agua y regar en el momento y con la cantidad apropiada, según con las condiciones meteorológicas, la lámina que requiere y el estado de desarrollo del cultivo. En la actualidad, la tecnificación del campo ha llegado a tal punto que se habla del Smart agro (Agricultura inteligente), que utilizan métodos e instrumentos en la parcela para medir el húmedo que se encuentra el suelo. Entre estos instrumentos se destacan los sensores, que permiten controlar la humedad del suelo y evitar el desperdicio de agua por sobre riego. Así, se puede aplicar el riego con precisión, de acuerdo con las características hidrofísicas del suelo y los requerimientos hídricos de los cultivos en función del clima (Flores-Medina et al., 2015).

Un problema para implementar estos elementos de medición de la humedad del suelo y estado climatológico es el alto costo que tienen los mismos. Además, muchos productores no tienen el conocimiento ni la disponibilidad para manejarlo a nivel de finca o encontrarlos en el mercado local, impide así el uso de las herramientas necesarias para regar los cultivos adecuadamente (Martínez, 2016).

Según Thompson & Gallardo (2018), la utilización de sensores remotos para medir la humedad del suelo ha demostrado ser una técnica efectiva y precisa. Su revisión de la literatura resalta la importancia de contar con sensores de humedad bien contruidos y calibrados para obtener mediciones confiables y garantizar un control de riego eficiente.

También la importancia de los sensores de humedad para la estimación precisa de la transpiración de las plantas. Utilizando datos de humedad del suelo obtenidos por sensores remotos, pudieron evaluar y mejorar los modelos de estimación de la transpiración. Esto muestra cómo los sensores de humedad bien contruidos y calibrados pueden influir en la precisión de las estimaciones hidrológicas y mejorar el control del riego (Miralles et al., 2016).

Jones (2004) destaca que los sensores de humedad del suelo son una herramienta valiosa para el riego preciso y eficiente. Estos sensores permiten obtener datos en tiempo real sobre la humedad del suelo, lo cual es esencial para programar y ajustar los ciclos de riego de acuerdo con las necesidades hídricas de los cultivos. Robinson et al. (2018) enfatiza la importancia de la construcción y calibración precisa de los sensores de humedad del suelo para garantizar mediciones confiables y representativas. Además, destaca la necesidad de considerar factores como la textura del suelo, la profundidad de la sonda y el tipo de tecnología utilizada al seleccionar y calibrar los sensores.

Eitel et al. (2017) muestra cómo los sensores de humedad del suelo son fundamentales para comprender las respuestas de los ecosistemas ante patrones de precipitación alterados. La construcción y calibración precisa de los sensores son esenciales para recopilar datos precisos y detectar cambios tempranos en la humedad del suelo, lo cual es fundamental para la gestión del riego en diferentes entornos agrícolas.

Según López-Urrea et al. (2019), la calibración adecuada de los sensores de humedad del suelo es esencial para garantizar mediciones precisas y confiables. La revisión destaca la importancia de calibrar los sensores para tener en cuenta factores como la variabilidad espacial del suelo, la influencia de la temperatura y la necesidad de ajustar las mediciones a condiciones locales específicas.

Abraha & Savage (2015) señala la importancia de la calibración de los sensores de humedad del suelo en la producción agrícola. El estudio demuestra cómo la falta de calibración puede llevar a mediciones erróneas y, por lo tanto, a decisiones incorrectas de riego. Por lo tanto, la calibración adecuada de los sensores ayuda a garantizar que los datos recopilados sean confiables y utilizables para una gestión óptima del riego. Šimůnek & Van Genuchten (2018) destaca la importancia de la calibración de las funciones de retención de agua y conductividad hidráulica del suelo para la precisión de las mediciones de humedad del suelo. Estas funciones se utilizan para relacionar los valores medidos por los sensores con el contenido real de agua en el suelo.

### **Objetivo general**

- Desarrollar sensores de bajo costo para la determinación de humedad del suelo y validación de datos mediante transmisión remota, con fines de aplicación en un riego eficiente.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo.
- Probar y calibrar el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos.
- Validar los datos recogidos de los sensores de humedad mediante la transmisión remota de datos a través de una Raspberry Pi o Arduino.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Antecedentes

Castro-Popoca et al. (2008), así como Lugo et al. (2011) concuerdan de la importancia de conocer los sensores que se van a utilizar, previo a la instalación de módulo de sensores y electroválvula a un microprocesador para la automatización de riego. También recalcan que el sistema automatizado de riego beneficia el manejo eficiente del agua, por la aplicación de la lámina de riego cuando la planta y el suelo lo necesite y se pueden implementar para diversos cultivos. Por otro lado, Valencia & Sepúlveda, (2019) mencionan que los manejos de sensores para automatización tienen como objetivo fortalecer la producción de los pequeños y medianos agricultores, esto mediante el control de la aplicación de riego, fertilizantes y manejo de plagas y enfermedades.

Segovia-Cardozo et al., (2021) expresan que al utilizar sensores se obtiene un seguimiento casi exacto de las formas convencionales de medición de humedad, para el manejo y lectura de los datos obtenidos por los sensores se pueden implementar o utilizar software de libre acceso, los mismos que permiten tener una comunicación bidireccional, es así que se podrá predecir por ejemplo, la saturación del suelo o punto de marchites, y con ello enviar información con las órdenes para apertura o cerrar el riego.

Ascencios et al., (2020) y Cabrera-Moreira et al., (2018) muestran la importancia de la calibración de los sensores para tener una validez de la precisión de la lectura de los sensores, esta calibración va a depender de diferentes factores, como el coeficiente de variación de manufactura, tipo sensores para diferentes suelos, variaciones ambientales, entre otros. La calibración se la puede obtener mediante los resultados de lecturas de diferentes sensores, teniendo una regresión lineal  $R^2$  superior al 90% como válidas de los datos y que representa la ecuación en las gráficas. En un estudio similar realizado por Cabrera-Moreira et al., (2018) se calibró una sonda TDR 300 modelo 6430FS para suelos ferralíticos rojos típicos de Cuba, donde lo utilizaron para la determinación de humedad y aplicación de riego. Ante todo esto, Ascencios et al., (2020) resaltan que la calibración de los sensores permite una automatización confiable y segura para un control y monitoreo de cualquier sistema automatizado, para este caso un sistema de riego, logrando mejorar la eficiencia del riego y ahorro de agua en la aplicación. (Ramos-Carbajal et al., 2020)

Ramos-Carbajal et al., (2020), en un proyecto realizado para automatización de riego diseñó ocho tipos de sondas de diferentes formas (cinco de ellas en forma de cono y tres en forma de cuña) y dimensiones, para analizar la precisión de datos en suelo obtenido como

resultado una correlación de R2 de 0.84 en la relación de la densidad aparente siendo la sonda más aceptada.

## **4.2. Propiedades del suelo**

Konijnenburg (2006) y el Instituto Nacional de Investigación Agroecuaría [INIA] (2015) definen que el suelo es la capa superficial donde crecen las plantas y expanden sus raíces para extraer agua y los minerales, el mismo que está conformado por roca madre, materia orgánica, agua, organismos vivos, entre otros; tiene una capacidad de almacenar láminas de lluvia para satisfacer la necesidad hídricas de los cultivos.

El suelo está compuesto de varias capas que se los denominan “horizontes”, estas capas son paralelas y tienen algunas características únicas como son las propiedades físicas y químicas por cada estrato, lo que se conoce como perfil del suelo, el mismo que está sustentado a sufrir variaciones por el pasar el tiempo, puede llegar a degradarse y perder sus características, sobre todo por el mal uso del suelo (INIA, 2015).

### **4.2.1. Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas hace referencia a la parte sólida del suelo, que está compuesta por diversas naturalezas, tanto químicas, como mineralógicas, en las cuales varían su forma, tamaño y orientación; esto hace que se divida en dos grupos: características físicas fundamentales, que son textura, color, estructura, consistencia, densidad y la temperatura; características físicas derivadas como son porosidad, capacidad del aire, capacidad de agua, compactación y la profundidad radicular (Gimenez, 2013).

#### **4.2.1.1. Color.**

Domínguez Soto et al., (2012) explican que el color del suelo es una característica importante en la morfología de suelo, la más notoria, fácil de determinar y esencial en la taxonomía del suelo. El color tiene una relación dentro de los componentes sólidos en el contenido de materia orgánica, la textura del suelo y la mineralogía que presenta en el suelo. Por lo tanto, un metal más notorio en la composición del suelo es una de las principales características para determinación del color en el mismo.

#### **4.2.1.2. Textura.**

En FAO (2016), explica que la textura, es la distribución de los componentes que contiene el suelo de acuerdo a su forma y tamaño de las partículas de arena, limo y arcilla, es una característica esencial, que tiene una influencia en la fertilidad de suelo, ayuda en la retención de agua, drenaje, e influye en la aireación que puede tener el suelo, como el contenido de materia orgánica por los diferentes tipos de componentes inorgánicos que tiene el suelo.

Molera & Llitjós (1995), expresan que la textura, que es la relación que tiene las diversas partículas minerales que tiene el suelo, como las gravas, limos, arenas y arcillas, esta propiedad es esencial, ya que aporta esencialmente al comportamiento de la cobertura vegetal y a la circulación de agua en las diversas capas que tiene el suelo, a la erosión que se puede tener en el medio.

#### **4.2.1.3. Estructura.**

La estructura del suelo permite controlar el contenido de agua y de gases en el suelo como su distribución y retención, mediante los poros del suelo (Gale et al., 2000b, 2000a). La estabilidad de la estructura es la influencia más importante para el crecimiento de las raíces, debido a que puede afectar la toma de oxígeno, agua y nutrientes del suelo (Vaz et al., 2001).

#### **4.2.1.4. Contenido de humedad en el suelo.**

Zotarelli et al. (2013), hace referencia que el contenido de humedad va a depender de la textura y estructura de cada tipo de suelo, en el cual se tiene un límite superior que es el contenido de humedad y un límite inferior que es el punto de marchitamiento permanente; también tiene un estado de saturación cuando hay una intensa lluvia o una aplicación excesiva de la lámina de riego.

La variedad de la densidad aparente y el porcentaje de arena, tiene una influencia en el contenido de humedad en capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, en lo cual, la diferencia de estos contenidos se determina en cuanto retiene de humedad el suelo (Soto et al., 2014).

##### ***4.2.1.4.1. Capacidad De Campo.***

Lanfranco et al. (2020) define a la capacidad de campo como la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo, cuando los macroporos son ocupados por aire, esta cantidad de agua en suelo se da después de 48 horas de una aplicación de riego o después de una intensa lluvia.

Así mismo, la capacidad de campo es la cantidad de agua en el suelo después de una lluvia o de riego, esta agua se drena de forma lenta y ocurre durante 1 a 3 días después de estos incrementos de agua en el suelo (Valipour, 2014). La capacidad de campo tiene un estado energético de 0.1 a 0.3 bares este estado va depender el tipo de suelo a tratar y del cultivo (Vasquez et al., 2017).

##### ***4.2.1.4.2. Punto de Marchitez Permanente.***

Se define como el contenido de agua está por debajo del límite inferior que tiene el agua que esta retenida por las fuerzas capilares absorbibles de las raíces siendo así que las plantas

no sean capaces de extraer agua (Lanfranco et al., 2020). Por otro lado, Vasquez et al. (2017), expresan que el punto de marchitez es un estado energético, que se encuentra entre 15 a 16 bares y este estado depende de algunos factores como el tipo de suelo y del cultivo.

#### ***4.2.1.4.3. Agua Disponible.***

Valipour (2014), expresa que el agua disponible se encuentra entre la capacidad de campo y el punto marchitez permanente, en el cual, esta agua es primordial para el desarrollo de las plantas. Así mismo, Kirkhan (2014), señala que el tipo de suelo que contenga más disponibilidad de agua tiende a mayor producción de la diversidad vegetal, a comparación de los suelos con poca agua disponible.

#### ***4.2.1.4.4. Capacidad de Aireación.***

Romano (1999), indica que la capacidad de aireación es resultado de la diferencia de la saturación que sufre el suelo con la capacidad de campo, los poros que contienen aire en la capacidad de campo son importantes, ya que suministra oxígeno a las raíces de las plantas y ayudan al drenaje de agua.

Chavarria & Pessoa dos Santos (2012), comenta que al tener una capacidad de aireación alto es satisfactoria para el desarrollo de las raíces de las plantas.

#### ***4.2.1.4.5. Saturación.***

Datta et al. (2017), expresa que la saturación es cuando todos los poros se encuentran llenos de agua, por lo cual la saturación dependerá de la textura que tiene el suelo, el suelo al encontrarse en ese estado no hay movimiento de agua en el mismo.

### ***4.2.2. Movimiento de agua en el suelo.***

El movimiento de agua que se puede realizar en suelos saturados o en suelos insaturados, en el cual esta se hace de forma gaseosa o líquida en el suelo; tiene como estudio en la dinámica del agua en el suelo, ya que se interpreta la interacción que hay entre suelo, agua y planta, esto influye en las funciones de la planta. Para que exista movimiento de agua en el suelo debe haber una diferencia o gradiente energético del potencial hídrico total entre los puntos que se están considerando. El agua dentro del suelo se mueve en función de este gradiente (García et al., 2012).

### **4.3. Instrumento para determinar la humedad del suelo**

Los instrumentos para medir la humedad están diseñados para que su manejo sea sencillo, se deben ajustar a la temperatura del suelo para tener mayor exactitud en las lecturas. Entre los instrumentos más utilizados para determinar la humedad se señalan a continuación:



#### **4.3.1. Tensiómetro**

Están conformado por la capsula de cerámica porosa, que está conectada a un indicador de vacío a través de un tubo de polimetilmeracrilato transparente, en la que se llena de agua, esto da una lectura en centibares que indica la tensión que tiene el agua retenida en el suelo, estas lecturas ayuda a determinar la velocidad de consumo del agua de la planta en suelo, también la velocidad de secado que sufre el suelo, y se puede determinar los periodo y tiempos adecuados de riego (Villablanca et al., 2014).

#### **4.3.2. La Sonda De Neutrones**

La sonda de neutrones ayuda a la determinación de la humedad del suelo. Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos este tiene un tamaño aparecidos al átomo de hidrogeno que está compuesto el agua. Estos neutrones rápidos al chocarse con los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos. Dentro de la sonda en un detector que mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan, esta medición se usa para estimar el contenido humedad de suelo, sin embargo debido a los diferentes tipo de suelo y su composición se debe calibrar de acuerdo a cada tipo de suelo, estas sondas en su instalación tiene que tener un tubo de acceso al suelo (Martin & Munoz, 2017).

#### **4.3.3. Sondas TDR (Time Domain Reflectometry)**

Estas sondas tiene como fundamento a la reflectometría del aire-agua-suelo y relacionada con el tiempo, estas sondas usan un método de constante dieléctrica o permitividad del suelo y ayuda a determinar el contenido de humedad del suelo (Ferrándiz & Puerto, 2017), tiene como principio el pulso electromagnético en las varillas de acero inoxidable, es un método de alta precisión de determinar la humedad, pero tienen inconvenientes además de un costo alto, que no es recomendable usarlo en suelos que tienen contenido de materia orgánica alto y suelo con textura fina (Dobriyal et al., 2012).

#### **4.3.4. Sensores que miden la constante dieléctrica del suelo**

Estos sensores tienen un capacitador que está incorporado de dos placas que son de un material conductor, separada por un espacio corto menos de 3/8 de pulgada, en lo cual en las placas se le aplica un voltaje al extremo de las placas, el medidor leerá este voltaje que son conducidos por las placas. Estos sensores proporcionara una información sobre el contenido volumétrico de agua que tiene el suelo expresado en  $m^3$  de agua por cada  $m^3$  de suelo, en lo cual, la humedad del suelo con este sensores es de 0 a  $0.4 m^3$  de agua por cada  $m^3$  de suelo, estos sensores son instalados en diferentes profundidades de la zona radicular del suelo y dando seguimiento al movimiento de agua y su agotamiento en la zona de la raíz (Enciso et al., 2018).

#### **4.4. Evaluación de los sensores.**

Vita et al. (2012) en su investigación recalca que mediante las observación de las mediciones de los sensores con la humedad volumétrica de los diferentes tipos de suelo no tiene una variación grande entre las dos por ende se simplifica los logaritmo de calibración y con ajuste que se debe incorporar en la programación de control de los sensores, por ultimo explica que esta ecuaciones de calibración y de precisión se debe implementar de acuerdo a la experiencia que se tenga en el campo.

Schugurensky & Capraro (2013) expone que en su sistema de sensores permiten fijar valores de humedad del suelo para cada parcela a lo largo de la vida de la planta, en su estudio explica el comportamiento de los sensores permiten realizar diferentes aplicaciones de riego, y con este sistema se puede ahorrar agua en la aplicaciones de riego y evitando contaminación al regar a capacidad de campo con respecto al riego tradicional.

Arango et al. (2021) en su estudio demuestra que tener un modulo de sensores para controlar la humedad de suelo, sensores para el caudal, sensores ultrasónico para medir el volumen del reservorio, relay que conecta electroválvulas y electrobomba con una conexión remota a través de internet puede operar su sistema de riego, con su calibración determina de sus sensores permitió monitorear y detectar algún fallo en el sistemas, con los sensores de humedad se pudo mantener la humedad cerca a la capacidad de campo mediante el riego, brinda una buena aireación para la planta, baja energía de retención del agua en el suelo para tener una disponibilidad de agua para la planta y mejorando la gestión de agua en la plantación.

#### **4.5. Componentes de un módulo del sensor**

##### ***4.5.1. Arduino***

Es una herramienta utiliza como hardware y software de libre uso para diversos usos en el mundo la informática, ayuda a la formación del aprendizaje a proyectos con hábito de creatividad e innovación. Arduino es una placa o plataforma de hardware libre basada principalmente en un microcontrolador, y un entorno de desarrollo (software), diseñado para facilitar el uso de la electrónica en los diversos proyectos multidisciplinarios. Es una tecnología con el uso de directo de hardware y software. En cuanto a hardware se compone por varias partes e interfaces las cuales esta reunidas en una placa de circuito. Arduino ha cambiado a lo largo de los años y han surgido diferentes tipos de placas (Vital, 2021).

##### ***4.5.2. Microprocesador Esp 32.***

Es un sistema On Clip creado por Espressif Systems esta microprocesador esta tiene incorporado wifi y bluetooth, funciona como alternativa de comunicación para una red de

internet para conectar diversos dispositivos microcontroladores o tarjetas de desarrollo, es un dispositivo independiente y versátil ya que cuenta con su propia aplicaciones y no tiene que estar conectado a un dispositivo externo (Santos & Santos, 2009).

**Figura 1.**

*Microcontrolador Esp-32.*

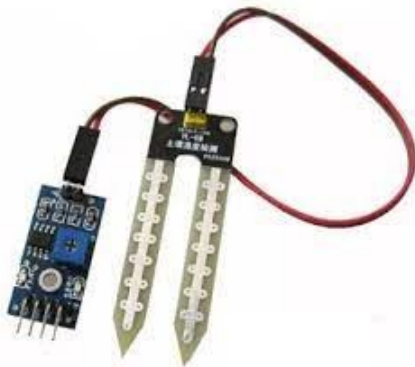


#### **4.5.3. Sensor de humedad Fc-28**

Los sensores de humedad Fc-28 constan de dos partes, la primera, está constituida por la sonda que estará en contacto con el suelo a monitorear, y la segunda, un circuito electrónico con los componentes necesarios para la captura de la señal analógica proveniente de la sonda (Bravo, 2017)

**Figura 2.**

*Sensor de humedad del suelo Fc-28.*



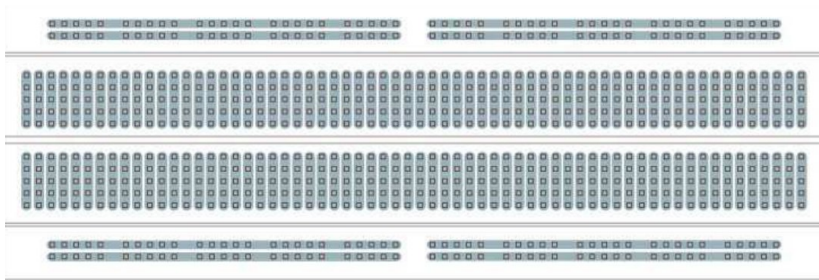
**Fuente:** Bravo, (2017)

#### **4.5.4. Protoboard.**

Lafebre (2019), en su guía explica que el protoboard es una herramienta que permite montar de forma circuito de forma sencilla y fácil, de todo tipo de tamaño, ayuda a depurar los diferentes tipos de circuitos hasta diseñar y construir la placa de circuito final, de esta forma se pueden ubicar temporalmente diferentes elementos como resistencias, leds, etc.

**Figura 3.**

*Protoboard.*



**Fuente:** Lafebre, (2019).

#### **4.5.5. Pantalla LCD.**

Es una pantalla delgada y plana que contiene pixeles de color o monocromos colocados delante de una fuente de luz, es alimentado por pequeños fragmentos de energía eléctrica. La pantalla tiene la función de reflejar las lecturas o lo transmitido del resto de componentes, en dar a conocer el funcionamiento óptimo que se tiene el equipo (Hernández, 2019)

**Figura 4.**

*Pantalla LCD.*



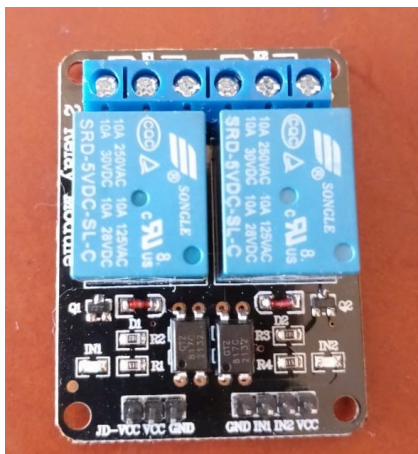
**Fuente:** (Hernández, 2019)

#### **4.5.6. Relé 5 voltios con dos canales**

Es un módulo que tiene la función de ser un interruptor controlado por un electroimán que permite controlar el encendido y apagado de diferentes dispositivos de alto voltaje o amperaje con una pequeña señal en nuestro caso el arduino (Selectro, 2020).

**Figura 5.**

*Relé 5V de dos canales.*



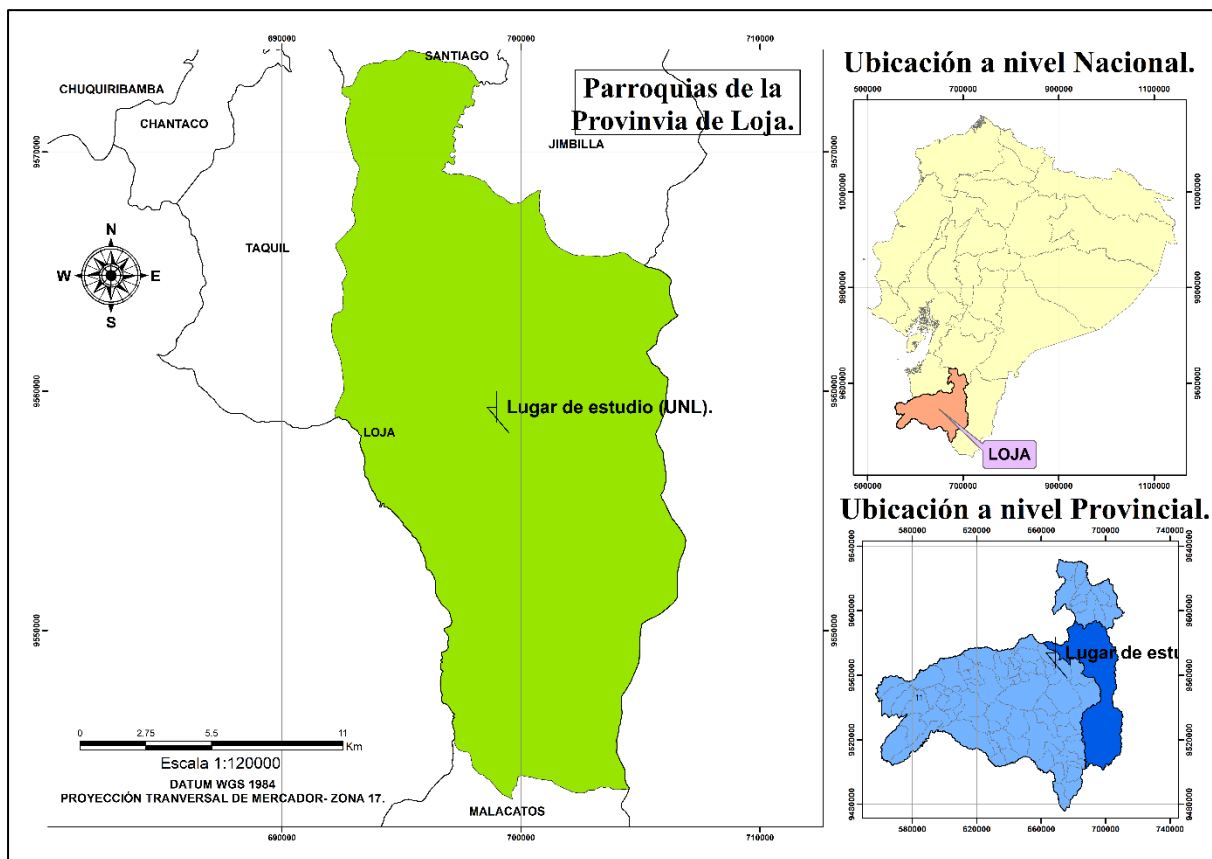
## 5. Metodología

### 5.1. Ubicación del proyecto.

El presente proyecto de investigación se desarrolló en las inmediaciones de la Carrera de Agrícola, de la Facultad de Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, ubicada en las coordenadas planas; Norte: 9 553 379 m y Este: 699 866 m; a una altitud media de 2144 m s.n.m.

### Figura 6.

*Lugar de estudio.*



### 5.2. Materiales

#### 5.2.1. Materiales de gabinete.

- Computadora.
- Calculadora
- Cronómetro
- Amperímetro
- Conductímetro
- Instrumentos de medición volumétricos (probetas)
- Cuaderno
- Esferográficos.

### ***5.2.2. Materiales para la construcción de los sensores para humedad***

- Sonda HW-80
- Convertidor HW-103
- Cables
- Protoboard
- Protoboard mini
- Pantalla LCD 20 x 4 I2C
- Fuente de alimentación externa (Baterías, cargador de celular.)
- LM393
- Resistencia 10000  $\Omega$  y 1000  $\Omega$
- Esp-32

### ***5.2.3. Sustratos para la evaluación del contenido de humedad***

- Suelo con seis tipos de textura.
- 18 masetas de 1000 ml o 1litro

## **5.3. Métodos**

Esta investigación tendrá como base el método experimental, el mismo partió desde la formulación del problema de la investigación y el planteamiento de los objetivos. Para el desarrollo de la misma se dividió en tres fases: la primera, la construcción de los sensores con materiales de bajo costo; la segunda fase la evaluación de las medidas del sensor y la comprobación del comportamiento, frente a sensores comerciales, en diferentes tipos de suelo. Finalmente, la tercera fase consistió en la monitorización de los datos obtenidos de los sensores a través del aplicativo web para lectura del riego.

## **5.4. Variables para la medición de los sensores**

Se seleccionaron seis tipos de suelos representativos (ver Tabla 1) para determinar el comportamiento de los sensores en la medición de la humedad. Partiendo de la premisa que la composición del suelo puede alterar a las lecturas de los sensores.

**Tabla 1.**

*Tipo de suelo para probar los sensores.*

<b>Tipos de suelos</b>	<b>Repeticiones</b>
Suelo orgánico	3
Suelo salino	3
Suelo Franco	3
Suelo Arenoso	3
Suelo Limoso	3
Suelo Arcilloso	3

## 5.5. Metodología para los objetivos.

### 5.5.1. Metodología del objetivo uno

#### *Diseñar y construir prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo*

Para este objetivo se plantearon tres prototipos de sensores para controlar la humedad de suelo con material anticorrosivo, donde los planos constructivos para el diseño se realizaron con la aplicación Proteus 8 de versión gratuita. Dentro de las consideraciones en el diseño se basaron en el tipo de materiales, que sean de buena conductividad eléctrica, de bajo costo y de fácil adquisición, si en lo posible fuera de materiales reciclados.

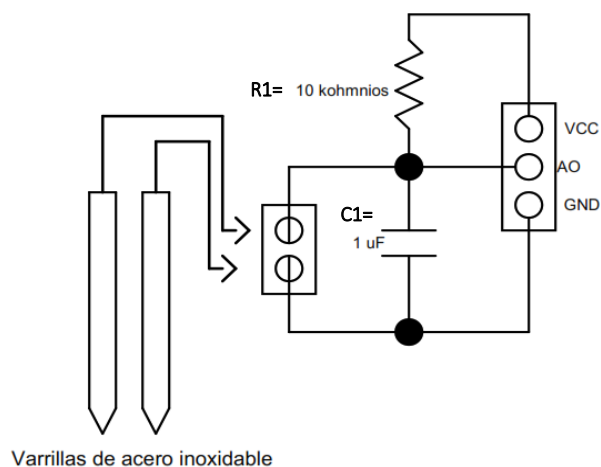
#### 5.5.1.1. Prototipo uno de sensor de humedad

La Figura 7 muestra el diseño para el prototipo uno de sensor, se siguió el procedimiento de Martin (2020), donde muestra el circuito para un prototipo de sensor con materiales anticorrosivo de bajo costo. La lista de componentes para la construcción es:

- Una bombera de tornillo de dos contactos
- Una fila de pines para tres contactos (Ao, GND,VSS)
- Una resistencia de  $10\text{k}\Omega$  1/4 W (R1)
- Sonda (Clavo de acero)
- Un capacitor cerámico de  $0,1\mu\text{F}$  (C1)
- Soldadura de estaño.
- Una baquela

#### Figura 7.

*Diseño del prototipo uno de sensor de humedad del suelo.*



**Fuente:** (Martin, 2020)

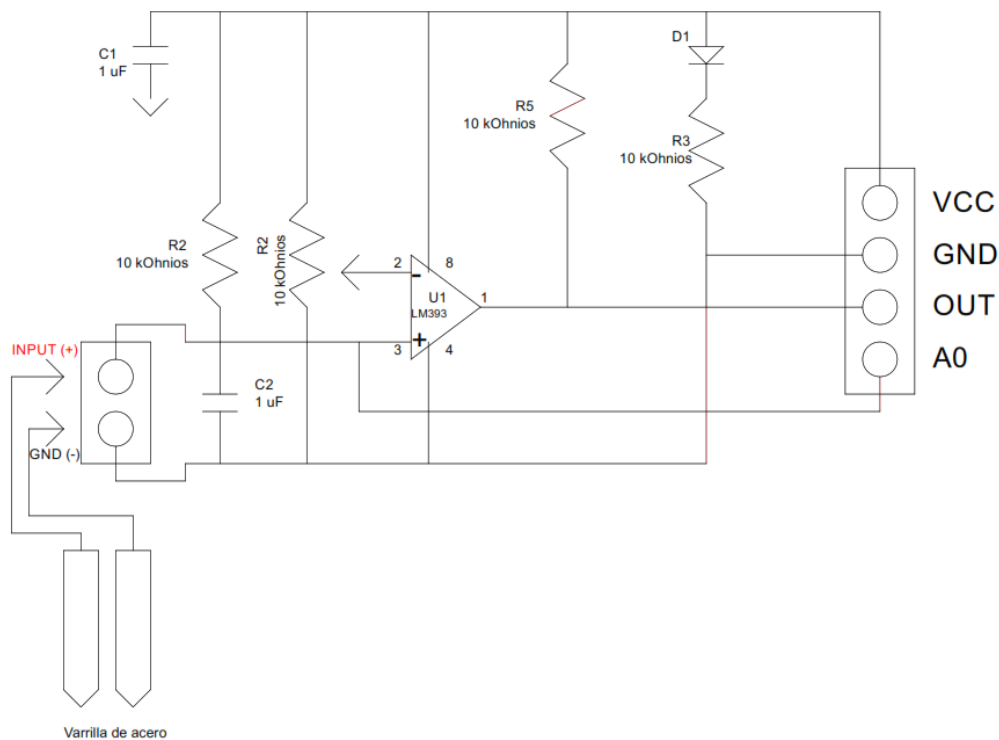
### 5.5.1.2. Prototipo dos de sensor de humedad del suelo.

Para el diseño del sensor de humedad del suelo, se tomó como referencia los modelos de sensores comerciales disponibles en el mercado (Figura 9). Sin embargo, se realizaron ciertos ajustes y modificaciones para adaptarlos a los materiales eléctricos que pueden estar al alcance de los agricultores. La lista de componentes utilizados para la construcción es:

- Una bombera de tornillo de dos contactos
- Una fila de pines para tres contactos (A0, OUT, GND,VSS)
- Una resistencia de  $10\text{k}\Omega$  1/4 W (R1, R2, R3, R4, R5)
- Sonda (Clavo de acero inoxidable)
- Un capacitor cerámico de  $0,1\mu\text{F}$  (C1, C2)
- Soldadura de estaño.
- Una baquela
- LM393 (U1)
- Diodos led (D1)

**Figura 8.**

*Diseño del prototipo dos de sensor de humedad del suelo.*





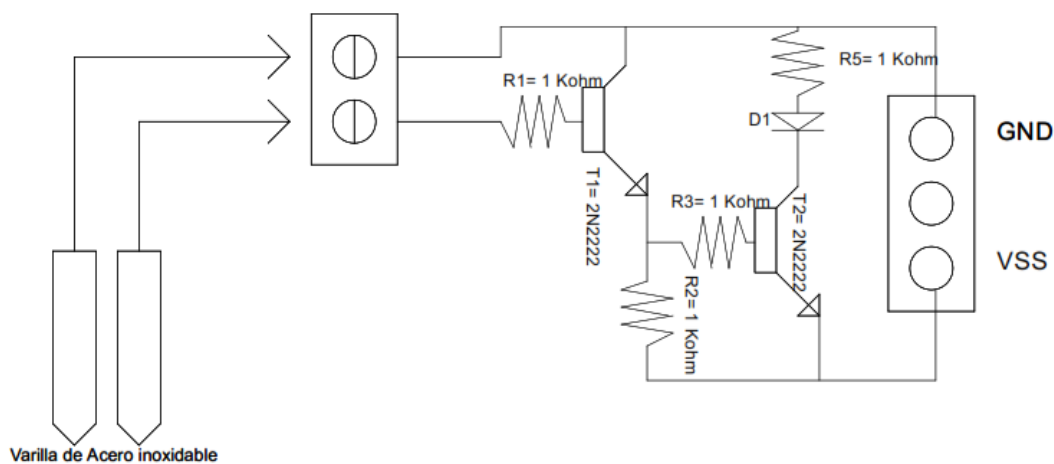
### 5.5.1.3. Prototipo tres de sensor de humedad

En la Figura 8, indica el diseño de sensor en la cual siguiendo recomendaciones de García (2012), donde realiza con una sonda con material conductor. La lista de componentes para la construcción es:

- Una bombera de tornillo de dos contactos
- Una fila de pines para tres contactos (GND,VSS)
- Una resistencia de  $10k\Omega$  1/4 W (R1, R2, R3, R4, R5)
- Sonda (Clavo de acero inoxidable)
- Transistores 2N2222
- Baquelita
- Diosled (D1)

**Figura 9.**

*Diseño del prototipo tres de sensor de humedad del suelo.*



**Fuente:** (García, 2012)

### 5.5.2. Metodología de segundo objetivo

*Probar y calibrar el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos*

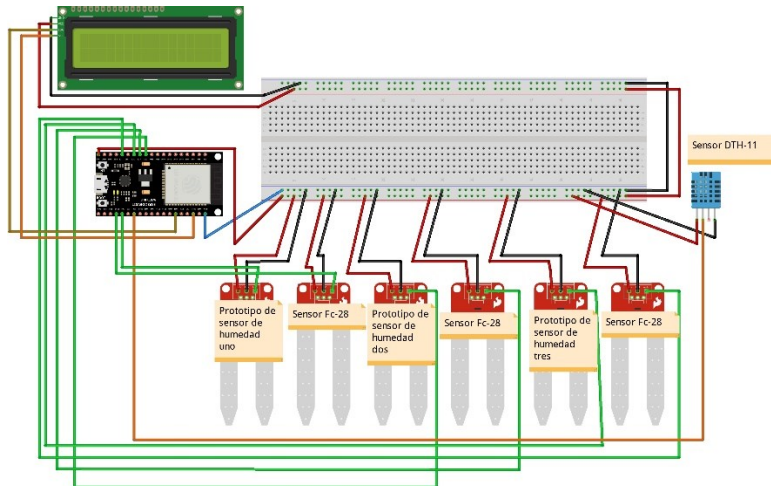
#### 5.5.2.1. Diseño del módulo de los sensores de humedad del suelo: propuestos, sensores comerciales; sensor ambiental DHT-11 y pantalla LCD.

Para la calibración de los prototipos de sensores de humedad del suelo, se construyó un módulo específico. Este módulo incluye tanto los prototipos de sensores fabricados y los sensores comerciales (Fc-28) como punto de referencia. Además, se incorporó un sensor de temperatura y humedad ambiente (DHT-11) que fue controlado por un microcontrolador (Esp-

32). La pantalla LCD, como se muestra en la Figura 10, fue utilizada para visualizar las lecturas obtenidas durante el proceso de calibración.

### Figura 10.

*Módulo de los prototipos de sensores de humedad, sensores Fc-28, DHT11.*



#### 5.5.2.2. Elaboración del código para el funcionamiento del módulo.

Para la programación del módulo se obtuvo primero los códigos para cada componente, esto con el fin de corroborar si las instalaciones funcionaban correctamente y reconocía a los sensores y pantalla LCD. Esta prueba también permitió conocer el estado funcional de todos los elementos y componentes de la instalación, y así evitar posibles daños o circuitos no funcionales, que alteren la toma de medidas, así se detectó que algunos pines analógicos estaban estropeados y que eran daños provenientes desde fábrica.

Los códigos de programación se obtuvieron del libro de Santos & Santos (2009), los mismos que se describirán a continuación para cada componente

##### 5.5.2.2.1. Elaboración del código para las lecturas del sensor de humedad.

Los prototipos de sensor construidos y para los comerciales, se construyó el código de los sensores que se muestra en la Tabla 2, utilizando el lenguaje de programación Python, por ser de libre acceso.

### Tabla 2.

*Código de los sensores de humedad del suelo.*

```
const int SensorPin = 36;
void setup() {
  // Poner el código para ser ejecutado
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  int moisturePercentage = analogRead(SensorPin) ;
```

```

moisturePercentage = map(moisturePercentage, 0, 4095, 100,
0);
Serial.print("Sembrio Saturado ");
Serial.print(moisturePercentage);
Serial.println("%");
delay(1000);
}

```

### 5.5.2.3. Calibración de la pantalla LCD.

En la Tabla 3 se indica el código para el funcionamiento de la pantalla LCD 20\*4, la misma que permite visualizar los mensajes y/o las lecturas de los sensores.

**Tabla 3.**

*Código de pantalla LCD.*

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Se coloca el numero de columna y filas que tiene la LCD
int lcdColumns = 16;
int lcdRows = 2;
const int SensorPin = 36;
// Establezca los pines para conectar la LCD al arduino
// Si no conoce la dirección de la LCD, ejecute el escáner I2C
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    // initialize LCD
    lcd.init();
    // turn on LCD backlight
    lcd.backlight();
}
void loop() {
    // Establezca el numero de columna y fila para que muestre el
mensaje en la LCD
int moisturePercentage = analogRead(SensorPin) ;
moisturePercentage = map(moisturePercentage, 0, 4095, 100, 0);
lcd.setCursor(0, 0);
String shs = "Sensor 1"+String((float)moisturePercentage);
Serial.print("Sembrio Saturado ");
Serial.print(moisturePercentage);
Serial.println("%");
lcd.print(shs);
delay(1000);
// Se borra el mensaje para salir de nuevo con otro dato.
lcd.clear();
}

```

#### 5.5.2.3.1. Sensor DTH-11 para humedad y temperatura ambiente.

De la misma forma, se elaboró un código (Tabla 4) para ver el funcionamiento de este tipo de sensor, para que realice lecturas de temperatura en grados °C y porcentaje de humedad relativa del ambiente.

**Tabla 4.**

*Código de funcionamiento del sensor DHT-11.*

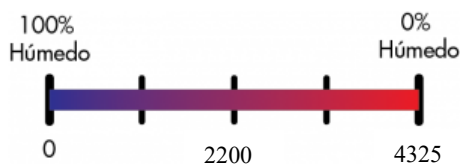
```
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 4 // Se conecta al pin 4 del EPS-32 para la instalación
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
//Definir el puerto para el sensor de humedad
// Inicialización del sensor DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("DHTxx test!");
  dht.begin();
}
void loop() {
  TemSensor();
}
//Método para el sensor de temperatura
void TemSensor(){
  // Tiempo de esperar entre lecturas.
  delay(2000);
  // La temperatura de lectura o la humedad tardan unos 250
milisegundos
  // Las lecturas del sensor también pueden ser de hasta 2 segundos
'viejo' (es un sensor muy lento)
  float h = dht.readHumidity();
  // Lectura de temperatura en Celsius
  float t = dht.readTemperature();
  // Lectura de temperatura en Fahrenheit
  float f = dht.readTemperature(true);
  // Check if any reads failed and exit early (to try again).
  if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }
  // Calcula el indice de calor
  // Muestra la temperatura en Fahrenheit!
  float hi = dht.computeHeatIndex(f, h);
  Serial.print("Humidity: ");
  Serial.print(h);
  Serial.print(" %\t");
  Serial.print("Temperature: ");
  Serial.print(t);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print(f);
  Serial.print(" *F\t");
  Serial.print("Heat index: ");
  Serial.print(hi);
  Serial.println(" *F");
}
```

### 5.5.2.3.2. *Parámetros para transformar el código de los sensores de humedad en datos.*

La medición de los sensores es de modo analógico, por lo que es necesario transformar a modo digital. Para ello, el microprocesador detecta el nivel de voltaje entregado por el sensor y lo convierte en un número equivalente a la cantidad de humedad detectada, entre 0 y 4325. Así, los valores son representados en una recta entre 0 y 4325 (ver Figura 11), cuando el sensor no detecta humedad (o estado seco) entrega un valor de 4325 y cuando detecta un valor de alta humedad entrega un valor de 0 (o cercano a 0).

#### **Figura 11.**

*Escala para interpretación de la humedad dada por el sensor Fc-28.*



**Fuente:** (Santos & Santos, 2009).

### 5.5.2.4. **Pruebas del módulo sensor.**

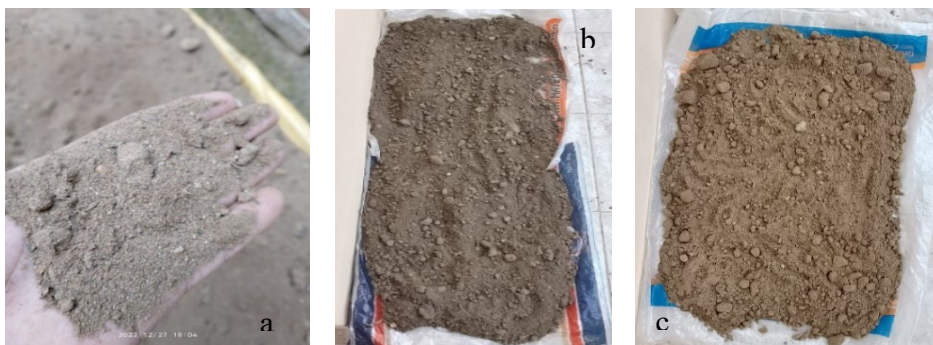
Para realizar las pruebas de instalación y funcionamiento del módulo sensor, antes que nada, se seleccionaron diversos tipos de suelos (salinos, orgánicos, francos, arcillosos, arenosos y limosos) para tener representatividad y variedad del comportamiento de cómo actúan los sensores. Las muestras de suelo fueron tratadas de la siguiente forma, previo al llenado de las macetas:

#### 5.5.2.4.1. *Secado del suelo*

El secado de los suelos se realizó de manera natural, para lo cual se tendió en la superficie del suelo, aislado por un saco y dejándolos al sol durante 48 a 72 horas, esto dependiendo del estado de humedad del suelo obtenido, como muestra en la Figura 12.

#### **Figura 12.**

*Secado de los diferentes suelos.*



Nota: a) Suelo arenoso, b) Suelo orgánico, c) Suelo franco.

#### 5.5.2.4.2. Llenado y pesado de las macetas

Las macetas se precedieron a llenar con 1000 g de suelo. Se consideraron tres macetas por cada tipo de suelo, dando un total de 18 macetas evaluadas, como lo muestra la Figura 13.

**Figura 13.**

*Pesado de las macetas y macetas con cada tipo de suelo.*



#### 5.5.2.4.3. Cantidad de agua para aplicar al suelo.

La estimación de la cantidad de agua necesaria para aplicar al suelo se consideró que por cada kilogramo de suelo se debe agregar un litro de agua, lo que equivale al 100% de agua contenida en el suelo. En la Tabla 6 se indican las cantidades de agua requeridas que se aplicaron al suelo con sus diferentes porcentajes de humedad. Por cada incremento de humedad aplicado en las macetas, se toma las medidas con los sensores una por una, y así hasta completar el 30%.

**Tabla 5.**

*Cantidad de agua aplicar por cada porcentaje*

Porcentaje (%)	Peso (ml)	Peso (Kg)
0	0	0
5	50	0,05
10	100	0,1
15	150	0,15
20	200	0,2
25	250	0,25
30	300	0,30

Con los datos obtenido, se procedió analizar mediante la correlación y se obtuvieron las curvas características de humedad en función al volumen de agua aplicada y sobre las lecturas de los sensores de humedad cuando se está agregando las cantidades de agua, pero cuando se dejó secar se relaciona las lecturas de los prototipos de sensores con los días transcurridos.

### ***5.5.3. Metodología objetivo 3***

#### ***5.5.4. Validar los datos recogidos para programación de los sensores mediante la transmisión de los datos a través de un Arduino.***

La validación de los datos recogidos de los sensores mediante el arduino Esp-32, son transmitidos y visualizados en la página Riego UNL, donde se realiza el análisis de los datos monitoreado y recolectados de los sensores configurados. Otro aplicativo que da la página es que se la puede utilizar para operar de forma remota y dar la orden para que se aplique el riego, cuando tenga que darse, está consigna se la puede asignar en bases al contenido de humedad del suelo.

La página también permite verificar la recepción y almacenamiento de los datos enviados, esta información recibida viene clasificada de forma sencilla y da la alerta de si regar o no. Esta alerta se puede controlar y debe ser transmitida para dar información a electroválvulas, esto para procesos futuros de automatización, dicha información debe ser sencilla y comprensible para cualquier persona relacionada al manejo de riego. Por lo que será necesario monitoreará funcionamiento de los prototipos de sensores en los diferentes suelos.

## 6. Resultados

### 6.1. Diseño y construcción prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo

Durante el proceso de construcción de los diferentes prototipos de sensores, se llevaron a cabo varias pruebas para garantizar su óptimo funcionamiento. En primer lugar, se realizaron pruebas en un protoboard para verificar la adecuación de las conexiones en los diseños. Una vez confirmada la funcionalidad del circuito en esta etapa inicial, se procedió a soldar cada prototipo por separado en una placa universal de baquelita.

Cabe destacar que cada uno de los tres prototipos de sensores consta de dos componentes esenciales: una sonda y un circuito eléctrico. La sonda realiza un papel fundamental de energía, ya que se introduce en el suelo y permite la transferencia bidireccional de entre el suelo y el sensor. Por otro lado, el circuito eléctrico tiene la importante función de recibir y transmitir los datos recolectados por la sonda al microprocesador.

Con el fin de proporcionar una descripción detallada de los prototipos y sus características, se ha incluido la Tabla 6, donde se presentan las especificaciones de cada uno de ellos. Además, en la Figura 14 se puede apreciar visualmente la sonda, así como el circuito eléctrico, lo que facilita la comprensión de su estructura y funcionamiento. En el Anexo 1 se presenta la descripción del circuito eléctrico y de la sonda.

**Tabla 6.**

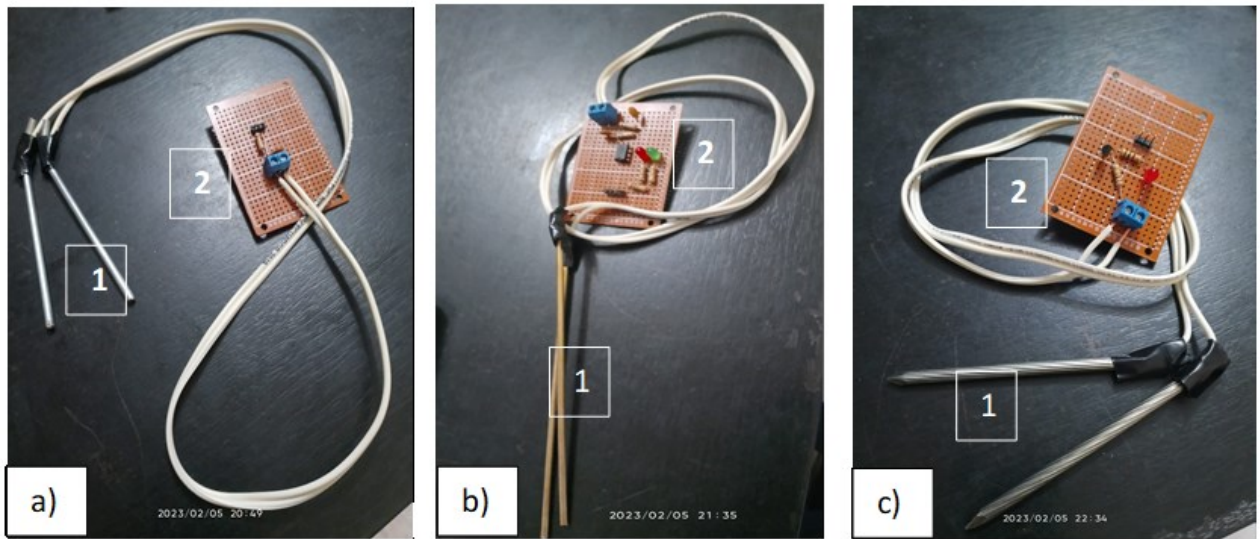
*Características de los prototipos de sensores.*

Partes del sensor	Prototipo Uno	Prototipo Dos	Prototipo Tres
<b>Sondas</b>	2 Varillas de cobre de 15 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm <sup>2</sup> ) de 300V con un largo de 35 cm	2 Varillas de acero inoxidable de 8,5 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm <sup>2</sup> ) de 300V con un largo de 35 cm	2 Varillas de acero de 10 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm <sup>2</sup> ) de 300V con un largo de 35 cm
<b>Circuito eléctrico</b>	Una bombera de tornillo de dos contactos Una fila de pines para tres contactos Una resistencia de 10kΩ 1/4 W Un capacitor cerámico de 0,1μF Soldadura de estaño. Una baquela	Una bombera de tornillo de dos contactos Una fila de pines para tres contactos Una resistencia de 10kΩ 1/4 W Un capacitor cerámico de 0,1μF Soldadura de estaño. Una baquela LM393 Diodos led	Una bombera de tornillo de dos contactos Una fila de pines para tres contactos Una resistencia de 10kΩ 1/4 W Transistores 2N2222 Soldadura de estaño Una baquela
<b>Costo de construcción</b>	La construcción de los sensores fue de \$ 2,50 (Ver Anexo 2)	La construcción de los sensores fue de \$ 3,51 (Ver Anexo 2)	La construcción de los sensores fue de \$ 3,00 (Ver Anexo 2)



**Figura 14.**

*Prototipos propuesto.*



Nota: a) Prototipo uno; b) Prototipo dos; c) Prototipo tres

## **6.2. Pruebas y calibración para el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos**

Para probar el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo, se verificó que los circuitos estén bien instalados. Se conectaron los sensores construidos, los sensores comerciales Fc-28, el sensor de humedad y temperatura ambiente DH-11 al microcontrolador Esp-32, el cual debía transmitir la información a la pantalla LCD (Figura 15).

**Figura 15.**

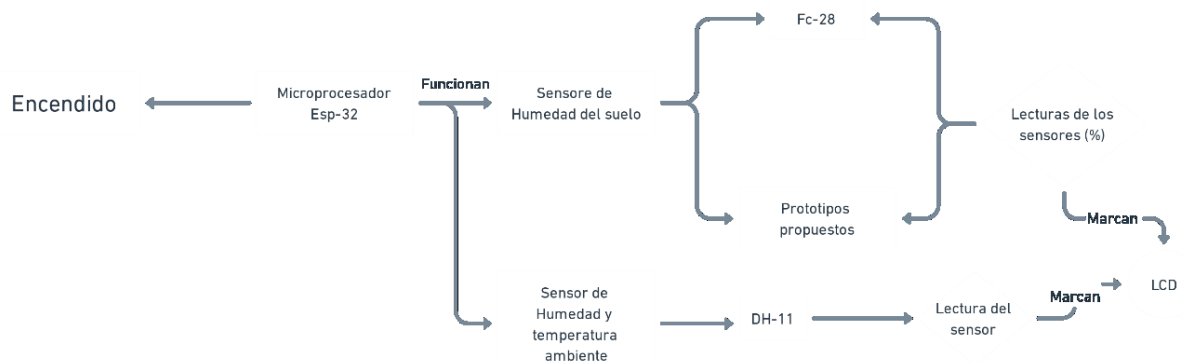
*Probando de conexión y funcionamiento de los prototipos de los sensores.*



La Figura 16, muestra el funcionamiento del código de programación que se utilizó para realizar las pruebas de los sensores en los diferentes tipos de suelo. La descripción del código se puede consultar en el Anexo 3.

**Figura 16.**

*Diagrama de flujo del código de programación.*

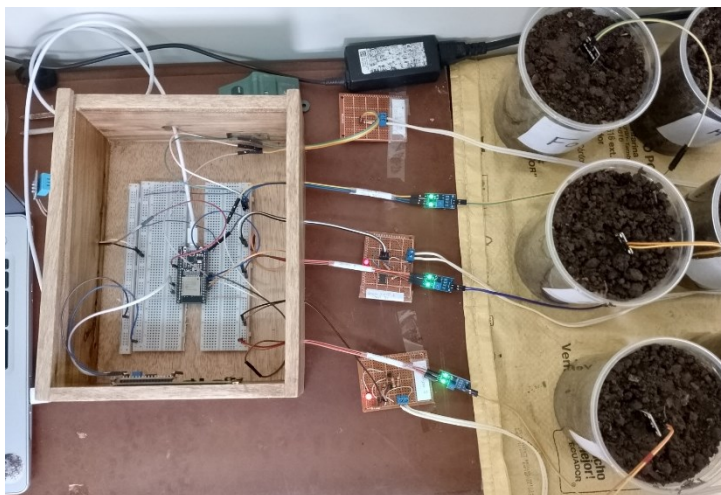


### **6.2.1. Prueba de los sensores**

La Figura 17 se muestra las conexiones de los sensores con el microprocesador (Esp-32) con el propósito de realizar pruebas en diferentes tipos de suelos. En la parte interna central de la caja se ubica el Esp-32, del cual despliegan las conexiones de los sensores, hacia la parte derecha externa de la caja. En la parte exterior se encuentran los circuitos eléctricos de los sensores en pleno funcionamiento, donde se visualiza la luz led de color verde encendida. Es importante destacar que estos circuitos eléctricos transmiten la energía necesaria a las sondas, las cuales están cuidadosamente instaladas en los suelos de las macetas, así realizar la lectura precisa de los niveles de humedad en cada uno de ellos.

**Figura 17.**

*Agregado de agua para las lecturas.*



Después se agregó el volumen de agua que muestra en la Tabla 4 a todas las macetas, y se fueron poniendo a prueba los prototipos de sensores de humedad en diferentes tipos de suelo, tendiendo como resultados un porcentaje de humedad por cada volumen de agua añadido. La Figura 18 muestra la instalación de los sensores en los diferentes suelos.

**Figura 18.**

*Prueba de los sensores.*

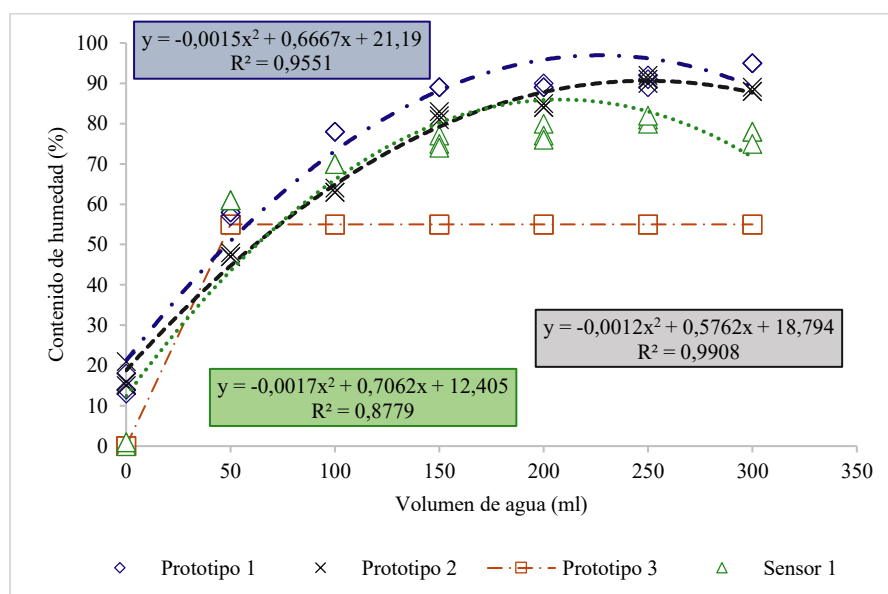


### 6.2.1.1. Prueba de los sensores en suelos Franco

La Figura 19 muestra las curvas de las lecturas de los diferentes prototipos de sensores para suelos francos en función de los volúmenes de agua agregados paulatinamente, según la metodología descrita. Se observa que el primer prototipo exhibe una variación en las mediciones a partir de 100 ml de agua, con una correlación significativa de  $R^2=0,96$ . El segundo prototipo, por su parte, muestra una variación mediana a partir de los 15 ml de agua, con una correlación aún más alta de  $R^2=0,99$ . En contraste, el sensor comercial (Fc-28) presenta una variación en las mediciones a partir de 150 ml de agua, aunque su correlación es ligeramente menor, siendo de  $R^2=0,88$ . El tercer prototipo, por otro lado, funciona únicamente como detector de humedad y detecta la humedad en el suelo desde el primer volumen de agua, esto lo realizó a partir de los 50 ml de tal manera se representó con un valor de 55% para visualizar su resultado.

**Figura 19.**

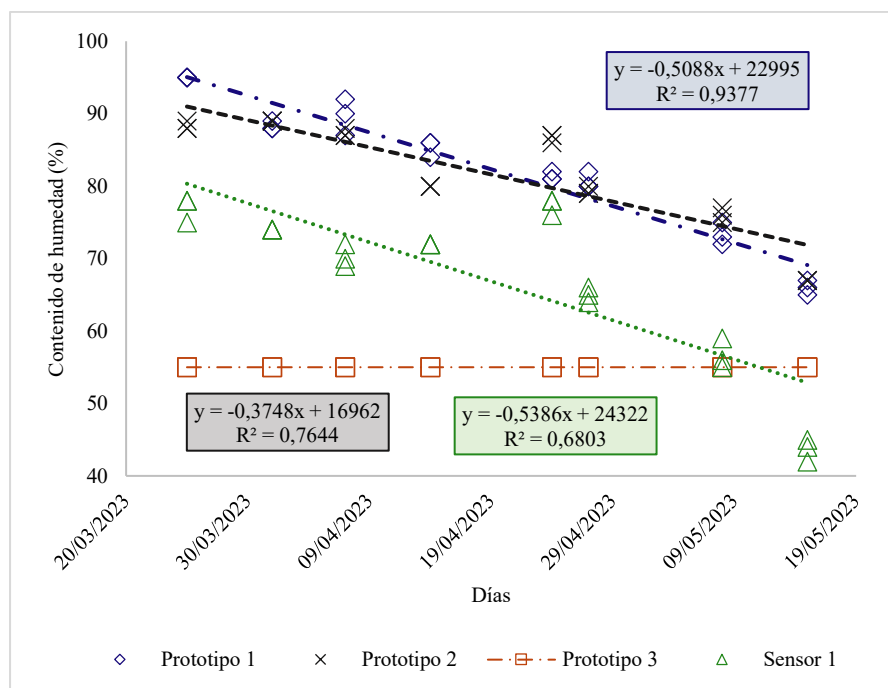
*Curva de calibración de sensores en suelos francos de forma ascendente.*



La Figura 20 representa los valores obtenidos desde que el suelo está en saturación hasta cuando el suelo se seca por completo. En la cual se muestra una curva descendente, que resulta de forma lineal. Esto indica que los prototipos de sensores tuvieron diferencias en sus medidas de contenido de humedad en suelo franco. El prototipo uno tuvo una correlación  $R^2$  de 0,94, mientras que el prototipo dos tuvo una correlación  $R^2$  de 0,76. Estos desfases de datos se deben al contenido del suelo y al estado del suelo en las macetas y condiciones ambientales. En comparación con el sensor Fc-28, se obtuvo una correlación  $R^2$  de 0,68, lo que se debe al comportamiento del suelo durante el proceso de secado. Con respecto al prototipo 3, los resultados mostraron que la humedad era detectada en todas las ocasiones en las que se midieron, los valores obtenidos se representaron con un promedio del 55% para reflejar los resultados obtenidos de manera más precisa.

**Figura 20.**

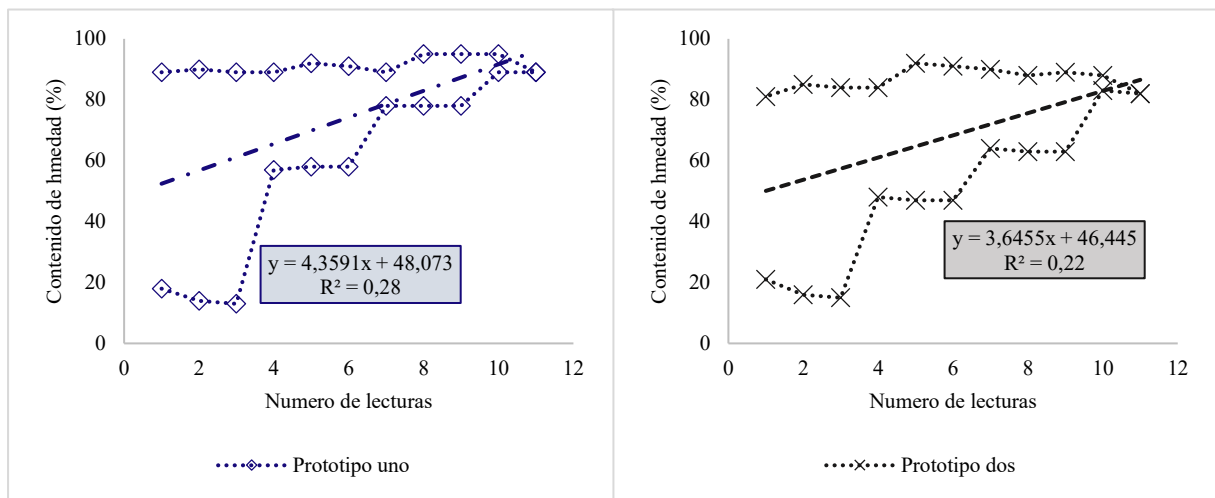
*Curva de contenido de humedad franco de forma descendente.*



Por otro lado, fue de interés analizar en conjunto el comportamiento de las medidas de los sensores, tanto de subida (incremento de humedad) y de bajada (disminución de humedad). Se pudo determinar que todas las mediciones de los prototipos produjeron un efecto de histéresis (Figura 21), donde se muestra una disminución de las medidas obtenidas, en la segunda fase de contenido de humedad ascendente con relación del volumen de agua que se aplicó en el proceso. En el Anexo 5 se muestra los análisis de histéresis del proceso de secado del suelo.

**Figura 21.**

*Histéresis de los prototipos de sensores para suelo franco.*

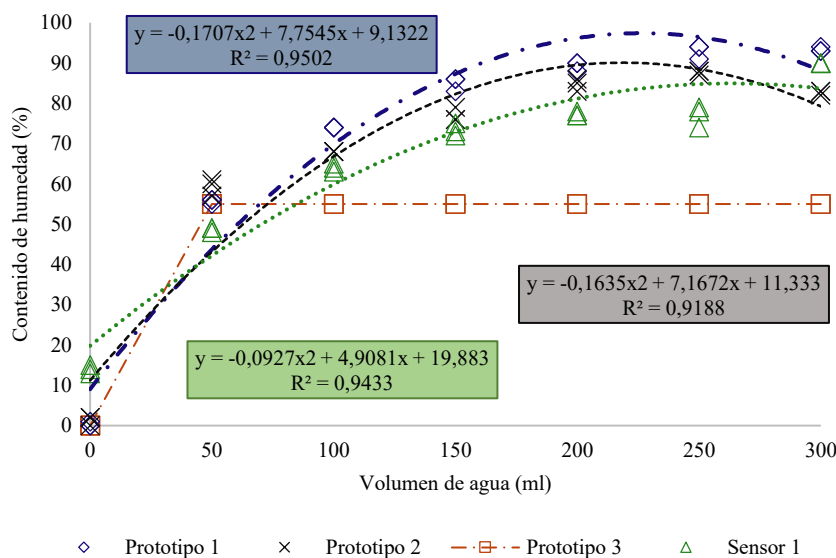


### 6.2.1.2. Prueba de los sensores en suelo Salino

En la Figura 22 muestra las mediciones de un suelo salino, el prototipo uno y dos presentan una variación en la medición, a partir de 150 ml de agua, con una correlación de  $R^2=0,95$  y de  $R^2=0,92$ , respectivamente. Por su parte, el sensor comercial (Fc-28), presenta una variación en la medición a partir de 300 ml de agua, con una correlación de  $R^2=0,94$ . El prototipo tres detectó la humedad desde el primer volumen de agua agregado, 50 ml de la misma manera que el anterior suelo.

**Figura 22.**

*Curva de calibración de los sensores para suelo salinos de forma ascendente.*

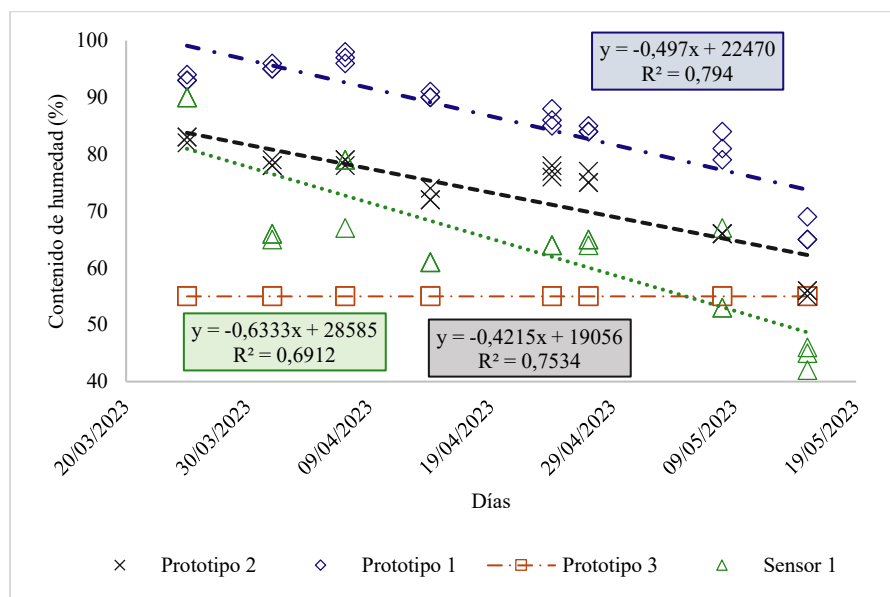


Por otro lado, la Figura 23 muestra la curva descendente que representan la disminución de la humedad del suelo a medida que se seca. Esta curva sigue una tendencia lineal. Se observó que los prototipos de sensores presentaron un mayor desfase en las mediciones del contenido

de humedad en suelos salinos. El prototipo uno mostró una correlación  $R^2$  de 0,79, mientras que el prototipo dos tuvo un  $R^2$  de 0,75. Estos desfases en los datos se deben a las características y estado del suelo presentes en las macetas utilizadas en el experimento. Por otro lado, el prototipo tres mostró resultados consistentes en todas las mediciones, detectando humedad en todas las ocasiones. Estos resultados se reflejaron mediante un promedio del 55% para representar de manera precisa los hallazgos obtenidos. En comparación, el sensor Fc-28 presentó una correlación  $R^2$  de 0,69. Estas diferencias se deben al comportamiento particular del suelo durante el proceso de secado.

**Figura 23.**

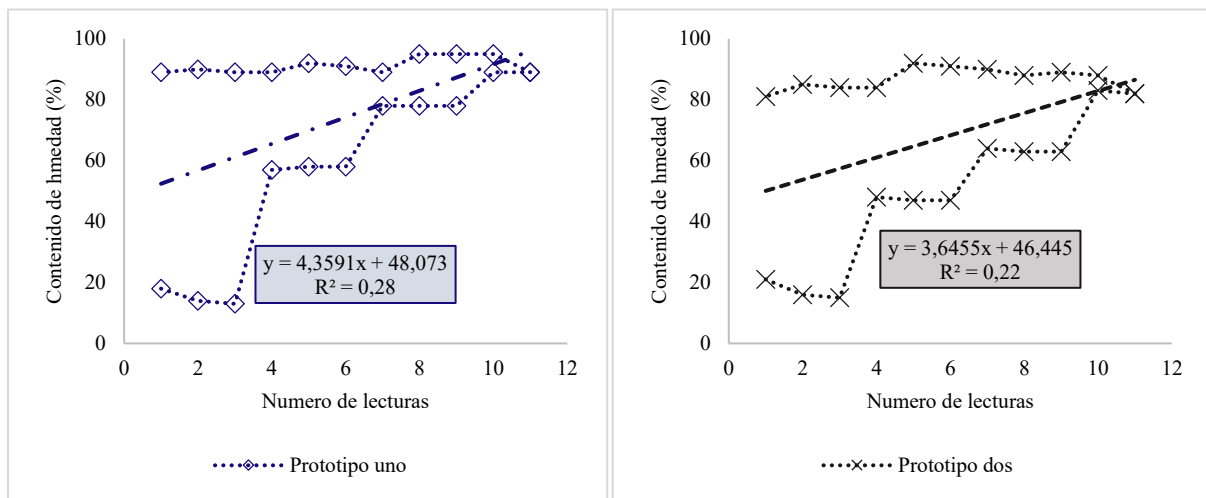
*Curva de calibración de los sensores para suelo salinos de forma descendente.*



Con las lecturas de los prototipos de humedad ascendente se observó un pequeño efecto de histéresis (Figura 24) en este suelo, con relación del volumen de agua que se aplicó en el proceso. En el Anexo 6 se muestra los análisis de histéresis del proceso de secado del suelo.

**Figura 24.**

*Histéresis ascendente de los prototipos en suelos salinos.*

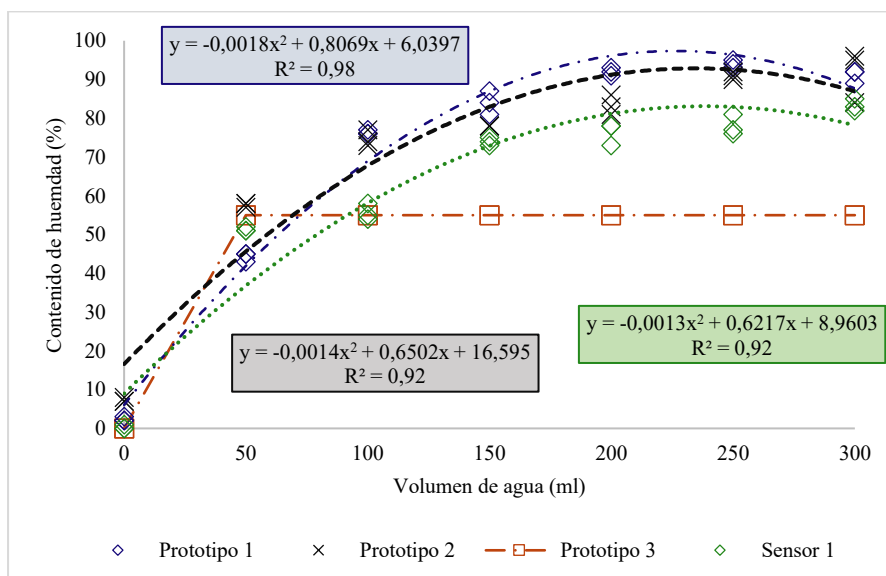


### 6.2.1.3. Prueba de los sensores en suelo orgánico

La Figura 25 presenta el prototipo uno y prototipo dos tiene una variación en la medición a partir de 150 ml de agua, con un  $R^2=0,98$  y  $R^2=0,92$ , mientras que el sensor comercial (Fc-28) muestra una variación a partir de 200 ml de agua, con una correlación menor de  $R^2=0,92$ . El prototipo tres solo funciona como detector de humedad y detecta la humedad en el suelo desde el primer volumen de agua agregado, este resultado se reflejaron mediante un promedio del 55% para representar la funcionalidad del prototipo.

**Figura 25.**

*Curva de calibración de sensores para suelos orgánicos*

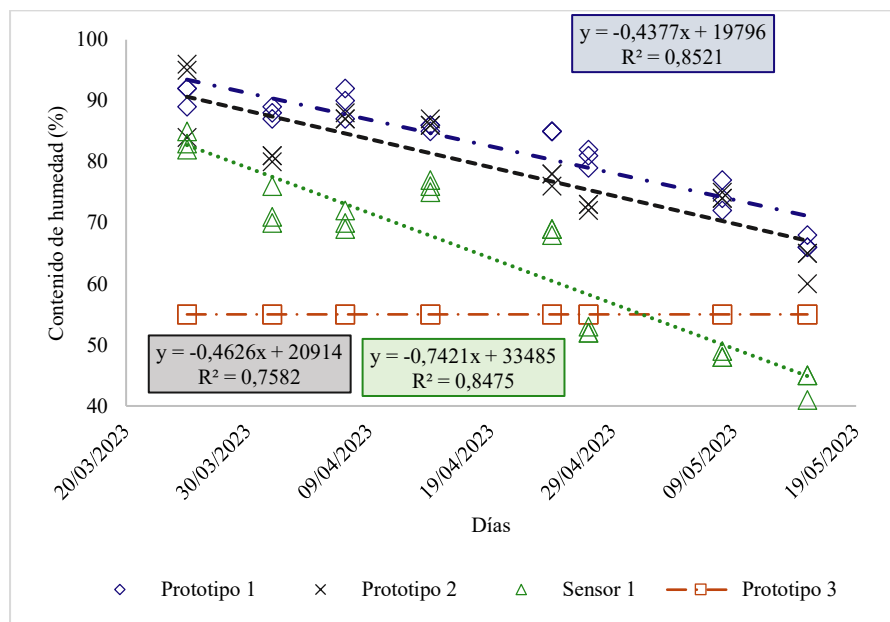


En la Figura 26 demuestra la curva de forma descendente en el suelo orgánico, en el prototipo uno se obtuvo un coeficiente  $R^2$  de 0,85, en cambio el prototipo dos tuvo una  $R^2$  de 0,76, por último el prototipo tres encuentra humedad en todo los días que se recolecto datos,

en comparación de todos prototipos con el sensor comercial (Fc-28) se obtuvo una coeficiente  $R^2$  de 0,85 esto se debe por el comportamiento del suelo se sufrió cuando se estaba secando el suelo, Los sensores tuvieron este desfase en las medidas debido al contenido materia orgánica del suelo.

**Figura 26.**

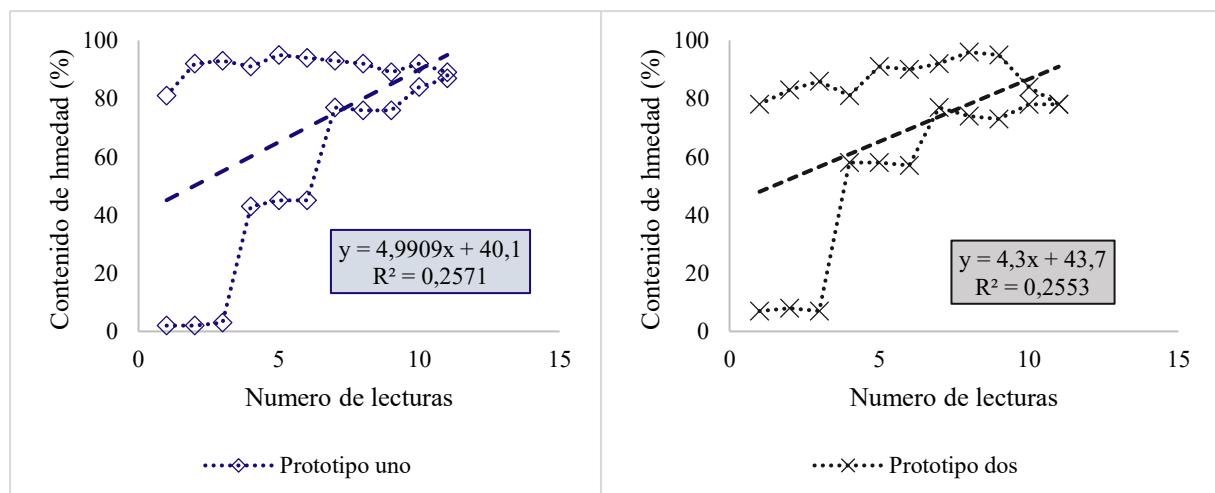
*Curva de calibración de los sensores para suelo orgánico de forma descendente*



A todo esto, en la Figura 27 muestra un efecto de histéresis tendiendo una relación de la humedad del suelo recolectado con el sensor (prototipo uno), en la fase ascendente cuando se le iba añadiendo volúmenes de agua al suelo.

**Figura 27.**

*Histéresis acendente de los prototipos en suelo organico*



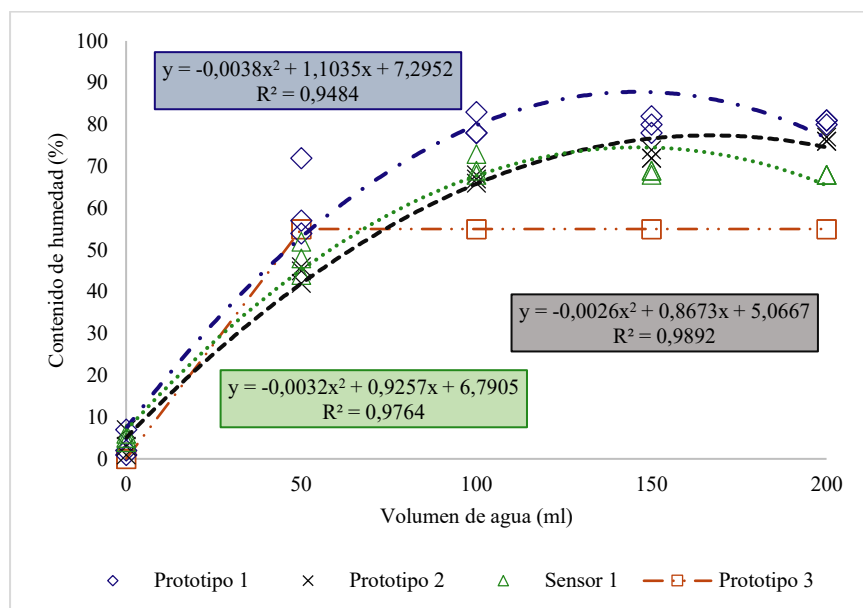


#### 6.2.1.4. Prueba de los sensores en suelo limoso

En la Figura 28 presenta que el prototipo uno, dos y el sensor comercial (Fc-28) tiene una variación de medida a partir de 50 ml de agua, con un  $R^2=0,95$ ,  $R^2=0,99$  y  $R^2=0,98$  respectivamente. En cuanto al prototipo tres solo funciona como detector de humedad y detecta la humedad en el suelo desde el primer volumen de agua agregado (50 ml).

**Figura 28.**

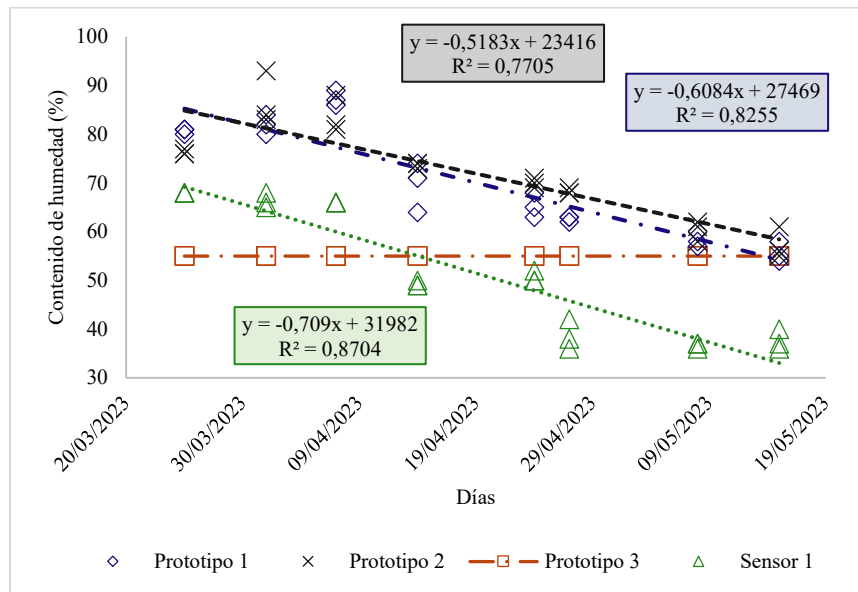
*Curva de calibración de sensores para suelos limoso*



La Figura 29 muestra una curva descendente de humedad en el suelo limoso. El prototipo uno exhibió un coeficiente  $R^2$  de 0,83, mientras que el prototipo dos mostró un coeficiente  $R^2$  de 0,77. Por otro lado, el prototipo tres detectó humedad en todos los días de recolección de datos, reflejándose en un promedio del 55% para una representación precisa. Al comparar los resultados con el sensor comercial (Fc-28), se obtuvo un coeficiente  $R^2$  de 0,87 debido al comportamiento del suelo durante el proceso de secado.

**Figura 29.**

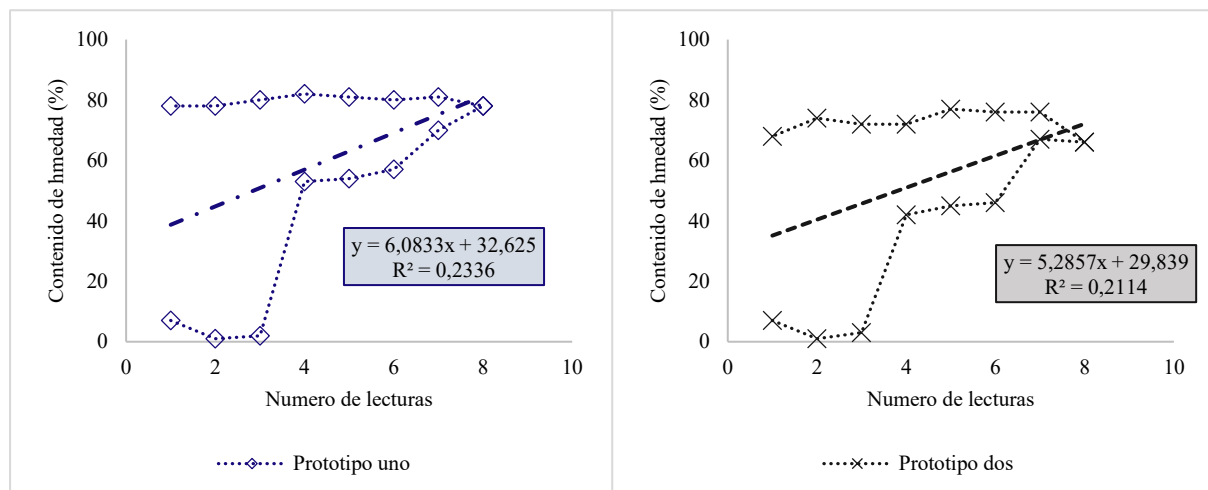
*Curva de calibración de los sensores para suelo limoso de forma descendente*



A pesar de todo, la Figura 30 ilustra el impacto de la histéresis al ajustar la proporción de humedad del suelo recolectado de los dos prototipos durante la fase ascendente, cuando se agregan cantidades de agua al suelo.

**Figura 30.**

*Histéresis ascendente de los prototipos en suelo limoso.*

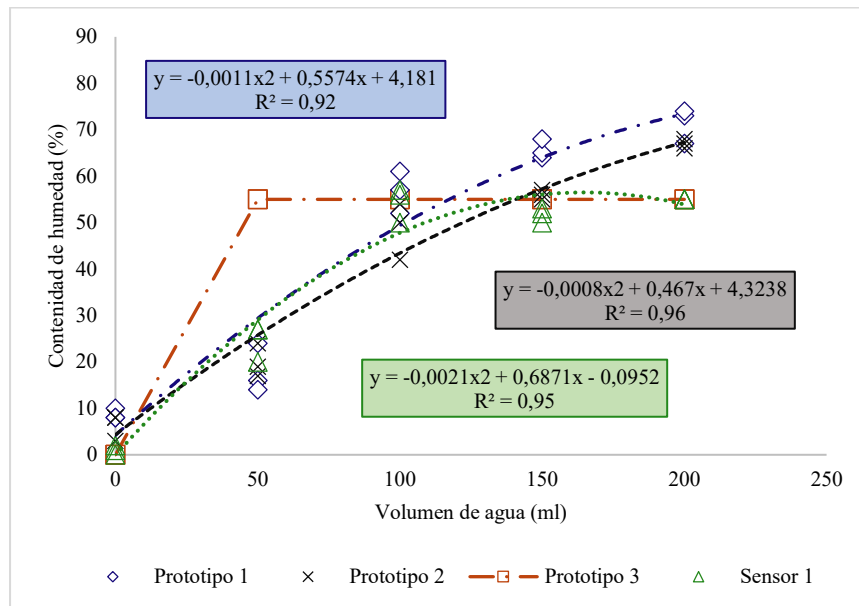


### 6.2.1.5. Prueba de los sensores en suelo arcilloso

En la Figura 31 pauta que el prototipo uno, el prototipo dos y el sensor comercial (Fc-28) muestran variaciones de medida en 50 ml de agua con  $R^2=0,95$ ,  $R^2=0,99$  y  $R^2=0,98$ . El prototipo tres solo funciona como detector de humedad, detectando la humedad en el suelo a partir del primer volumen de agua agregado (50 mililitros) representado por un promedio del 55% para representar de manera precisa la recopilación de datos de este prototipo.

**Figura 31.**

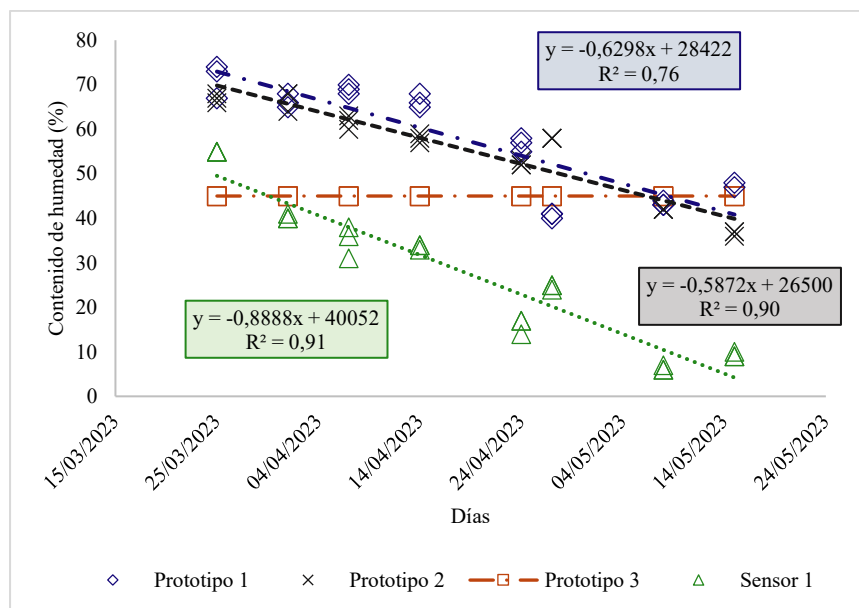
*Curva de calibración para suelos arcilloso de forma ascendente*



La Figura 32 muestra la curva de forma descendente en el suelo arcilloso. Los prototipos uno y dos tuvieron coeficiente  $R^2$  de 0,76 y 0,90 respectivamente. El prototipo tres detectó humedad durante todos los días de recopilación de datos, se representó mediante un promedio del 55% para reflejar de manera precisa la recopilación de datos de este prototipo. En comparación con todos los prototipos con el sensor comercial (Fc-28), se obtuvo una correlación  $R^2$  de 0,91.

**Figura 32.**

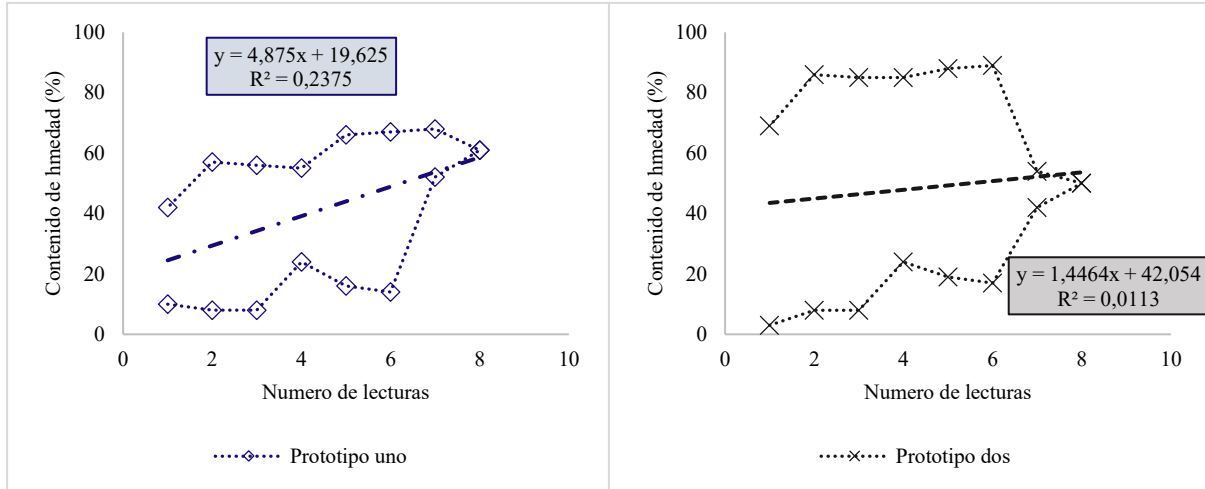
*Curva de calibración de los sensores para suelo arcilloso de forma descendente*



En la Figura 33, se observa un fenómeno de histéresis de los prototipos uno y dos que relación entre la humedad del suelo recolectado con volúmenes de agua añadidos al suelo.

**Figura 33.**

*Histéresis ascendente de los prototipos en suelo arcilloso*

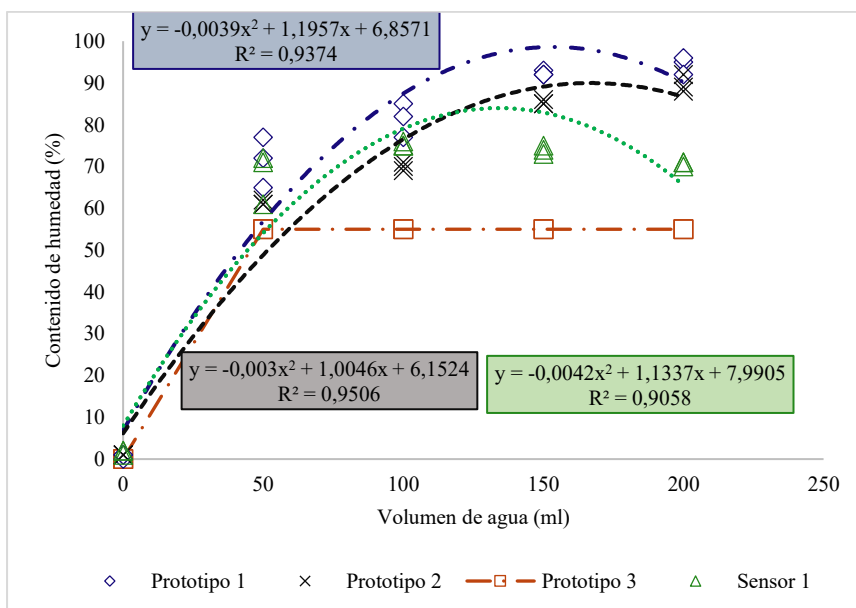


#### 6.2.1.6. Prueba de los sensores en suelo arenoso

De mi manera en la Figura 34 indica que el prototipo uno y el sensor comercial (Fc-28) muestran variaciones de medida en 50 ml de agua con  $R^2=0,94$ ,  $R^2=0,91$  individualmente y en cuanto al prototipo dos no expresa una variación significativa en todos los volúmenes, teniendo un  $R^2=0,96$ . El prototipo tres solo detecta la humedad en el suelo a partir del primer volumen de agua (50 ml) representado por un promedio del 55% para reflejar de manera precisa la recopilación de datos de este prototipo.

**Figura 34.**

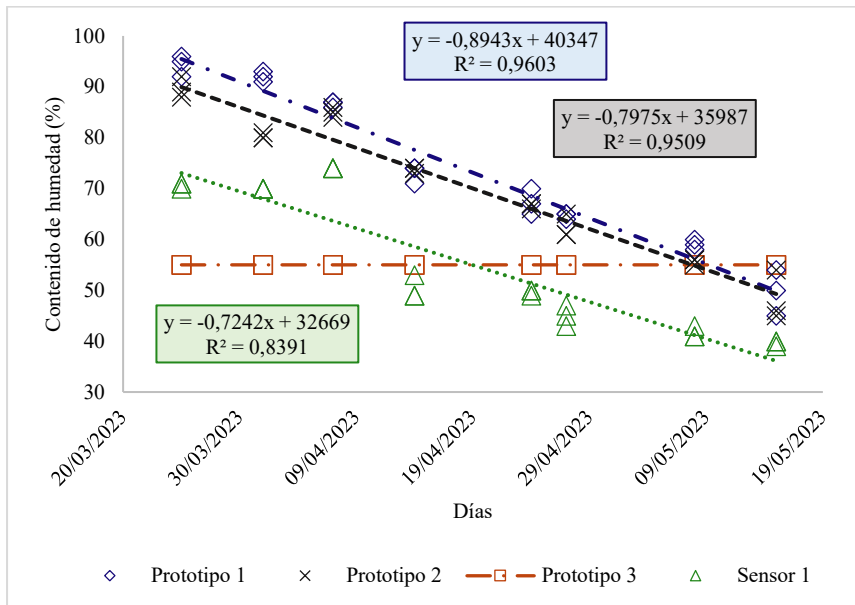
*Curva de calibración para sensores en suelos arenosos*



La curva de forma descendente en el suelo arenoso (Figura 35). En esta curva indica que el prototipo uno tiene un  $R^2$  de 0,96 y en el prototipo dos tuvo  $R^2$  de 0,95, en cambio el prototipo tres ya mencionado antes encontró humedad en este suelo durante todos los días de recopilación de datos. A comparación de los prototipos el sensor comer (Fc-28) obtuvo una correlación  $R^2$  de 0,84.

**Figura 35.**

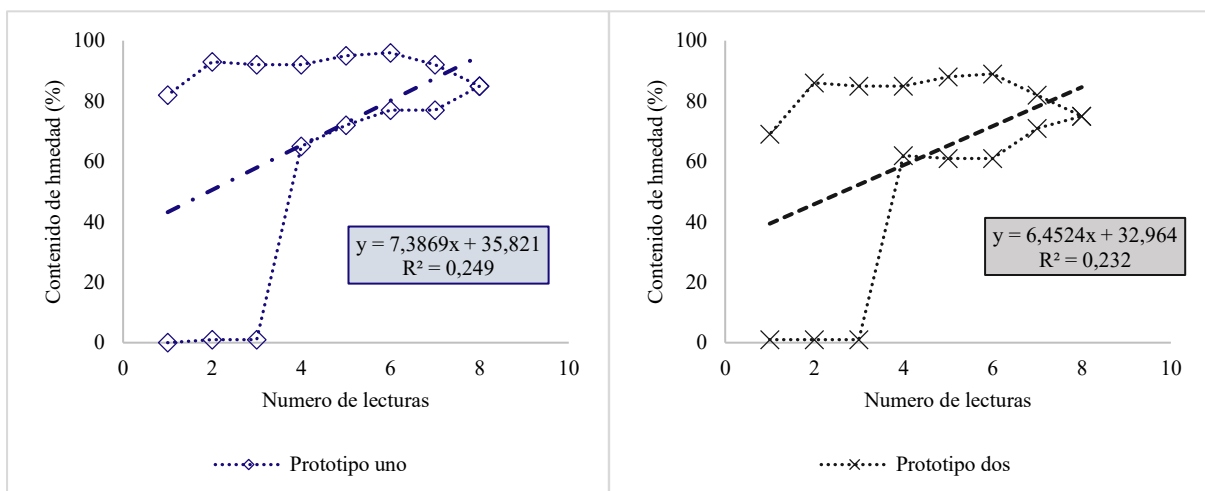
*Curva de contenido de humedad de suelo arenoso de forma descendente*



En este suelo se produjo un pequeño efecto de histéresis (Figura 36) con lecturas de los prototipos uno y dos con su contenido de humedad ascendente con relación del volumen de agua que se aplicó en el proceso.

**Figura 36.**

*Histéresis ascendente de los prototipos para suelo arenoso*



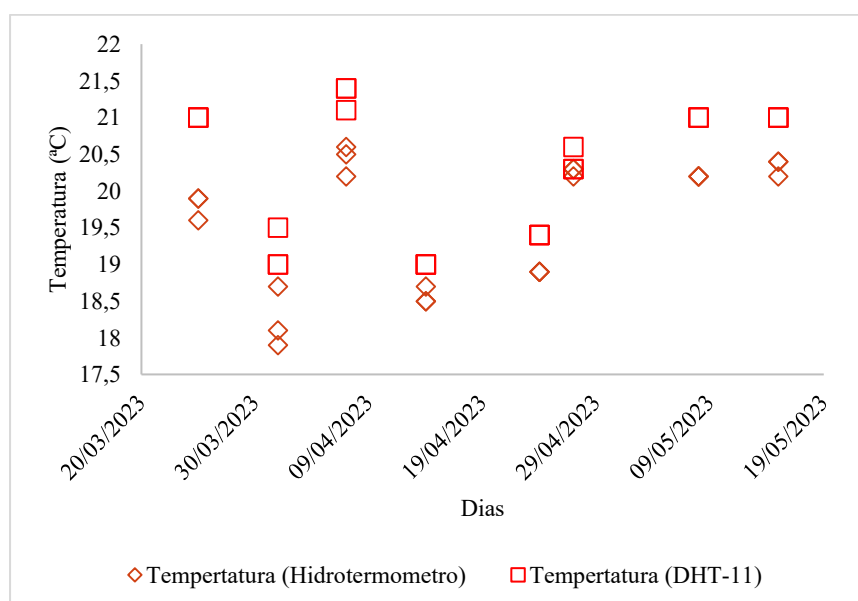
Como se puede observar en todos los resultados de las medidas de sensores, existe una variación entre medida y medida, lo que se presume puede ser causada por la forma de construcción de los sensores, ya que estos tienen un mayor contacto con la superficie del suelo, aproximadamente 8 cm, lo que implica, que en este traslado haya presencia de humedad en las capas superiores, que, en las inferiores, también se ve implicado el tipo de suelo, el que mejor infiltre del que mejor se encharque. Por lo que se recomendaría, rediseñar las sondas, cubriendo con un material aislantes, y dejando solo un espacio menor a 1 menor centímetro para que tenga contacto con el suelo.

### 6.2.1.7. Comparación y validación de los datos obtenidos de sensores de temperatura y humedad ambiente con un hidrotermómetro.

Se llevaron a cabo pruebas con los de sensores de temperatura (Figura 37) y humedad ambiente (Figura 38) añadidos al código de lectura (Anexo1), los cuales se comparó con los datos obtenidos de un equipo hidrotermómetro (HTC-1) (precisión  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 1\%$  HR), esto con el fin de corroborar y controlar las lecturas con precisión para manejar las condiciones ambientales, en el sitio de estudio, donde se encontraban operativos los sensores de humedad del suelo y se desarrollaron los ensayos. Mediante estas pruebas, se buscaba obtener datos confiables y comparables que permitieran monitorear y ajustar de manera efectiva, tanto la humedad del suelo como la temperatura ambiente en dicha zona. Estas mediciones adicionales contribuyeron a un análisis más completo y detallado del entorno, mejorando la comprensión y permitiendo una gestión más eficiente de los recursos relacionados con la humedad y la temperatura.

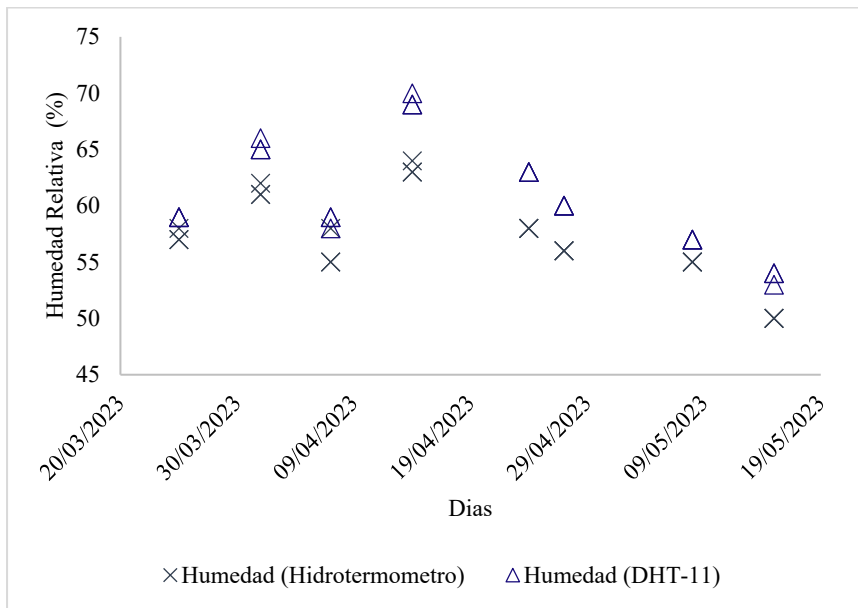
**Figura 37.**

*Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) del ambiente cuando estaba secando el suelo*



**Figura 38.**

*Humedad relativa (%) del ambiente cuando estaba secando el suelo*

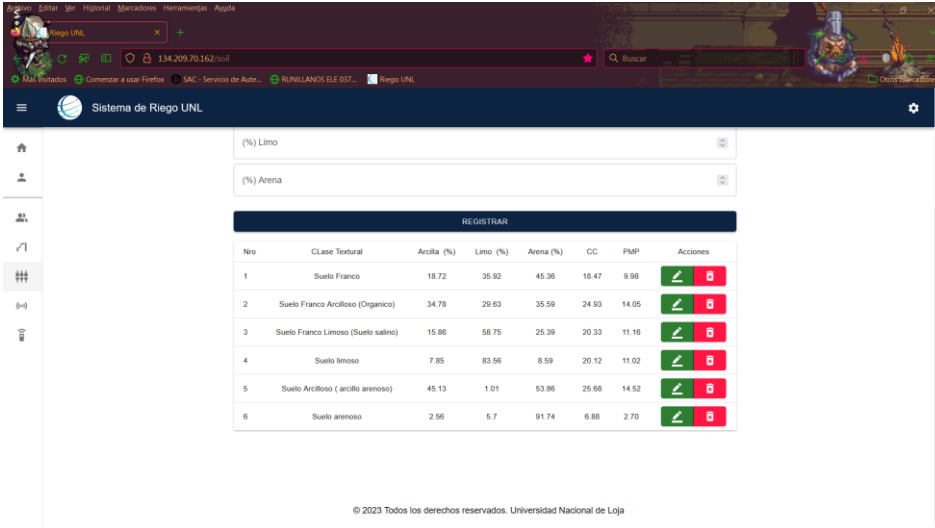


### 6.3. Validación los datos recogidos para programación de los sensores mediante la transmisión de los datos a través de una Raspberry Pi o Arduino.

Para configurar los sensores en la plataforma se debe seguir el manual (Anexo 17), por cual en la Figura 39, indica los tipos de suelo que se subió a la plataforma de “Riego UNL” esto suelo es para determinar las características de capacidad de campo y de punto de marchites permanente, para tener control de riego en diversos tipos de suelo.

**Figura 39.**

*Tipos de suelos agregados en la web.*



The screenshot shows the 'Sistema de Riego UNL' web interface. At the top, there are input fields for '(%) Limo' and '(%) Arena'. Below these is a 'REGISTRAR' button. The main content is a table with the following data:

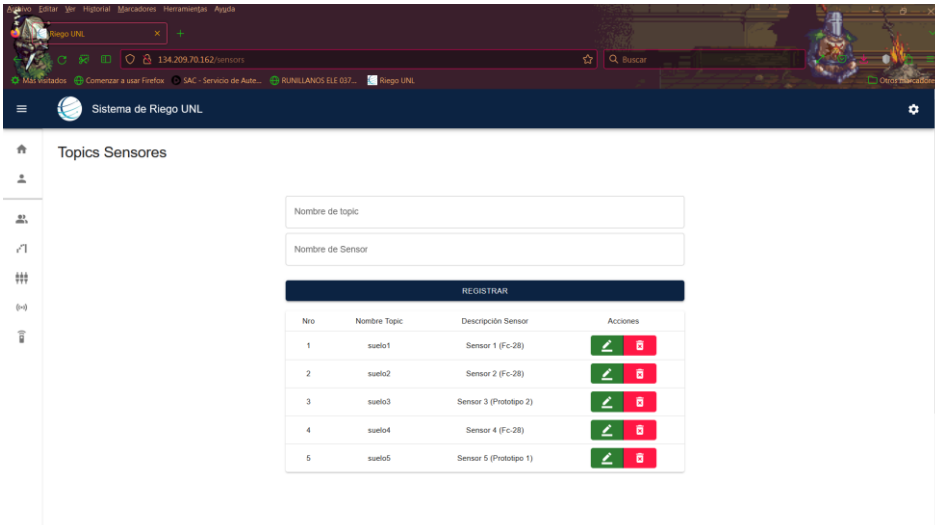
Nro	Clase Textural	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	CC	PMP	Acciones
1	Suelo Franco	18.72	35.92	45.36	18.47	9.98	[Edit] [Delete]
2	Suelo Franco Arcilloso (Organico)	34.78	29.63	35.59	24.93	14.05	[Edit] [Delete]
3	Suelo Franco Limoso (Suelo salino)	15.86	58.75	25.39	20.33	11.16	[Edit] [Delete]
4	Suelo limoso	7.85	83.56	8.59	20.12	11.02	[Edit] [Delete]
5	Suelo Arcilloso ( arcillo arenoso)	45.13	1.01	53.86	25.68	14.52	[Edit] [Delete]
6	Suelo arenoso	2.56	5.7	91.74	6.88	2.70	[Edit] [Delete]

At the bottom of the page, it says '© 2023 Todos los derechos reservados. Universidad Nacional de Loja'.

Posteriormente, en la Figura 40 demuestra los prototipos agregados en la plataforma con la ayuda del codigo dos (Anexo 17), este codigo puede conectar al aplicativo, gracias a la inculacion de la base de datos que se realizo el aplicativo.

**Figura 40.**

*Sensores de humedad en el aplicativo.*



The screenshot shows the 'Sistema de Riego UNL' web interface with the 'Topics Sensores' section. At the top, there are input fields for 'Nombre de topic' and 'Nombre de Sensor'. Below these is a 'REGISTRAR' button. The main content is a table with the following data:

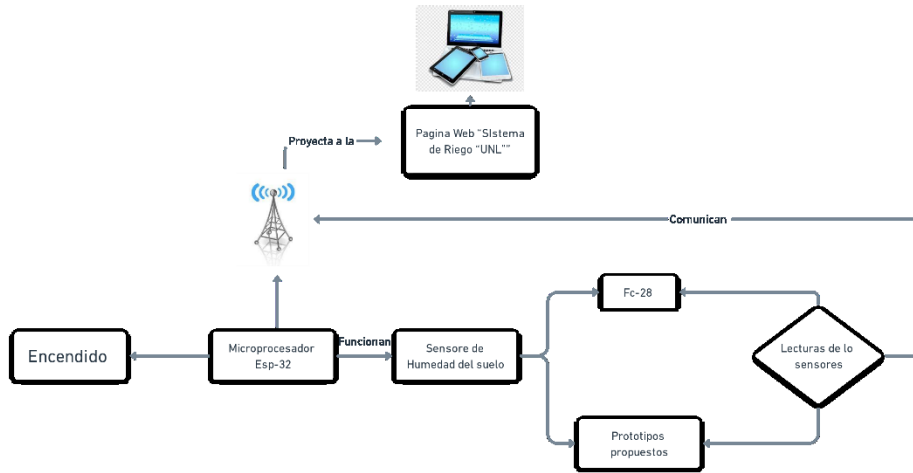
Nro	Nombre Topic	Descripción Sensor	Acciones
1	suelo1	Sensor 1 (Fc-28)	[Edit] [Delete]
2	suelo2	Sensor 2 (Fc-28)	[Edit] [Delete]
3	suelo3	Sensor 3 (Prototipo 2)	[Edit] [Delete]
4	suelo4	Sensor 4 (Fc-28)	[Edit] [Delete]
5	suelo5	Sensor 5 (Prototipo 1)	[Edit] [Delete]



El funcionamiento del código dos (ver Anexo 17) se puede entender en el diagrama de la figura 41 donde indica cómo funciona este código en el Esp-32 al aplicativo esto da por nombrar a los sensores con “Topics”, con esto se puede configurar los sensores en el aplicativo se debe revisar el manual (ver anexo 17)

**Figura 41.**

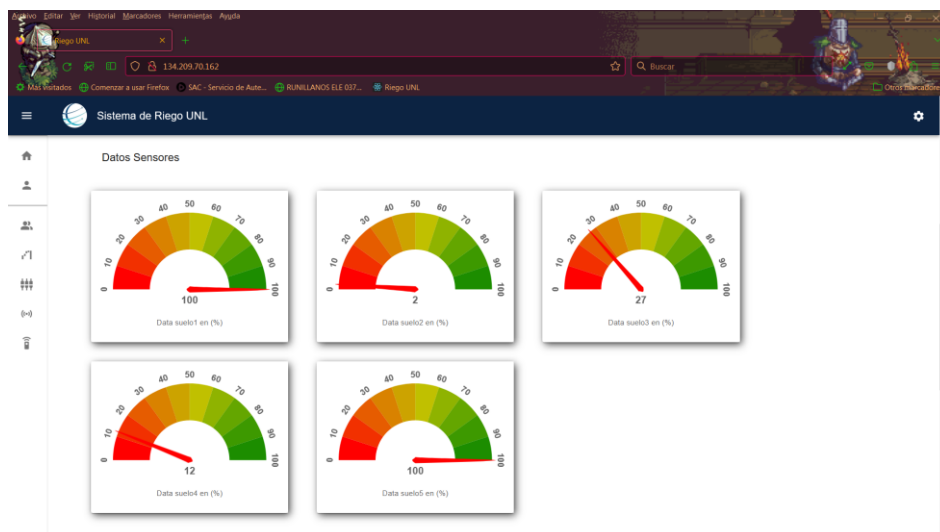
*Diagrama del código dos para el funcionamiento en el aplicativo.*



En la Figura 42, de muestra las lecturas de los prototipos uno y dos, como también los sensores comerciales (Fc-28), por cual esta aplicación sirve para un monitoreo exhaustivo de la humedad del suelo mediante lo sensores para una futura aplicación de riego.

**Figura 42.**

*Sensores de humedad en la plataforma “Sistema de Riego UNL”*



## 7. Discusiones

### 7.1. Diseño y construcción prototipos de sensores de humedad del suelo de bajo costo

Para la construcción de los sensores, en primer lugar, se realiza una diferenciación entre el material de la sonda y los componentes utilizados en los circuitos eléctricos. En el caso del prototipo uno, se enfoca en el circuito electrónico compuesto por una resistencia y un capacitor cerámico. Este modelo se basa en la propuesta de Martin (2020), quien descubrió un sensor de bajo costo utilizando materiales reciclados, como varillas de acero y cable conductor para la sonda.

Por otro lado, el prototipo dos incorpora el componente LM393 en su sistema, el cual se utiliza para cortar y medir los niveles de tensión en la entrada analógica del microcontrolador. Esta función es importante, ya que permite activar la energía en la salida de los sensores. Este diseño se inspira en los modelos comerciales, especialmente el Fc-28 (Thido Electrónica, 2013), y difiere significativamente de la propuesta de Martin (2020), quien no incluye este componente y realiza la transmisión directamente. En cuanto a la sonda de medición, no hay muchas diferencias en términos de dimensiones y forma de conexión, solo se extrajo una varilla de cobre y acero en este estudio, mientras que los sensores comerciales utilizaron fibra de vidrio envuelta en un conductor eléctrico de aluminio.

Tanto el prototipo uno como el dos tienen la función de medir la humedad del suelo según la variación de energía presente al respecto, proponer así una comunicación bidireccional entre los sensores y el suelo. Magán et al. (2016) presentó un diseño de sensores de humedad del suelo basado en medidas reales e imaginarias a través de la impedancia de los componentes del circuito. Se realizaron pruebas con diferentes materiales de sonda, y se encontró que el bronce ofreció los mejores resultados, especialmente en suelos salinos. Este estudio guarda similitud con los prototipos propuestos, ya que los materiales utilizados pueden utilizarse a diversos tipos de suelo, con una consideración especial para suelos salinos, que presentan mayores desafíos en la diferencia de las medidas. El prototipo dos, con su varilla de cobre, esto puede ser debido a que el cobre es un elemento altamente conductor de energía (Martínez, 2016).

Por su parte, los prototipos uno y dos se asemejan al diseño propuesto por Martínez (2016), quien desarrolló un sensor tipo FDR (reflexión y difracción de frecuencia) que establece una comunicación en tiempo real mediante radiofrecuencia, permitiendo determinar el estado del suelo y del cultivo. Estos prototipos se diferencian

de los sensores propuestos por Betancourth (2016), quien desarrolló un sistema de bajo costo capaz de medir el porcentaje de humedad del suelo utilizando un circuito RLC (resistor, inductor y capacitor conectado en serie o en paralelo). Este circuito se basa en la variación dieléctrica del suelo al aumentar la humedad.

Los prototipos presentan una variabilidad considerable en los datos, posiblemente debido a la sensibilidad y la amplia superficie de contacto de la sonda, lo cual puede generar cierto ruido en las mediciones hasta que se estabilicen. Santos (2021) propone el uso de sensores con materiales anticorrosivos, que utilizan un circuito divisor de tensión para medir la energía que el sensor aplica al suelo. De esta manera, se obtienen lecturas precisas cuando el suelo está húmedo y presenta menos resistencia, mientras que en suelos secos se registra una mayor resistencia y, por ende, una mayor tensión, lo que proporciona medidas más limpias.

En el caso del prototipo tres, la diferencia radica en el circuito eléctrico, donde se incorporan dos transistores 2N2222A331 para reducir la potencia eléctrica suministrada a las sondas. Este diseño se asemeja al propuesto por García (2012), que también es un detector de humedad del suelo y tiene la función de medir la humedad mediante la resistencia eléctrica o la capacidad eléctrica del suelo. El prototipo tres solo detecta la presencia de humedad en el suelo y emite una señal, por lo que no es recomendable para la agricultura de precisión, que requiere conocer el contenido exacto de humedad. No obstante, puede ser útil en casos de automatización de riego remoto, donde se necesita una señal para abrir o cerrar las válvulas. En la actualidad, en los procesos de automatización de riegos, simplemente se instalan electroválvulas y un programador o temporizador de apertura de llaves y encendido de bombas, esto lo hacen de manera convencional que programan la apertura a un día, hora y con un tiempo determinado, sin que se considere el estado del suelo o las precipitaciones (Gutiérrez-Guzmán et al., 2022).

El prototipo tres se asemeja al propuesto por Martos (2012), que es un detector de humedad con transistores. Este dispositivo proporciona una excelente medición de la humedad del suelo cuando está húmedo, activando una alerta, y se apaga automáticamente cuando está seco. Además, Lloret et al. (2021) presenta un prototipo de sensores de bobinas en una red de nodos inalámbricos, que pueden ayudar a los agricultores a optimizar los procesos de riego en la agricultura de precisión. Cada nodo inalámbrico está equipado con cuatro sensores de humedad del suelo, que pueden medir la humedad a diferentes profundidades.

La aplicación de estos sensores es de gran utilidad para monitorear la humedad del suelo, ya que permiten automatizar los sistemas de riego y controlar el suministro de agua de manera precisa. Enciso et al. (2018) explican que los sensores monitorean los contenidos de humedad en diferentes tipos de suelo, lo cual ofrece beneficios como la optimización de la producción, la conservación del agua, la reducción del impacto ambiental y el ahorro de dinero. Estos sensores ayudan a tomar decisiones más acertadas en la programación del riego. Silva et al. (2016) y Caldas et al. (2020) señalan que los sensores de bajo costo son una opción viable para monitorear la humedad del suelo, pero su precisión y rendimiento deben evaluarse cuidadosamente antes de su implementación.

## **7.2. Probar y calibrar el funcionamiento de los sensores de humedad del suelo de bajo costo en distintos tipos de suelos**

Para realizar las pruebas de medición y calibrar el funcionamiento de los sensores, se utilizó el código recomendado por Santos & Santos (2009) (Anexo 1). Este código permitió transformar la diferencia de voltaje enviada por la sonda al Arduino en un valor porcentual, que representa la humedad del suelo en el momento de la medición. La calibración consistió en definir los porcentajes y conocer los valores que los sensores arrojaban para diferentes tipos de suelos, con el fin de diferenciar las lecturas al incorporar diferentes cantidades de agua en los sustratos. Para ello, se realizó un análisis de correlación entre las lecturas de los sensores y los diferentes tipos de suelos, especialmente los salinos, obteniendo una mayor precisión en el prototipo uno, con correlaciones de  $R^2=0,95$ ,  $0,98$  y  $0,99$  para suelos salinos, orgánicos y francos, respectivamente. Estos resultados permitieron obtener curvas de calibración y conocer las variaciones de las mediciones para cada tipo de suelo. La precisión de los sensores puede variar debido a la presencia de sales o materia orgánica en el suelo.

Según Miralles et al. (2012), destaca que la salinidad del suelo puede interferir con las mediciones de humedad, debido a que el agua es conductora de electricidad y el suelo salino altera la conductividad eléctrica, lo cual se refleja en las mediciones de humedad de los sensores. Por lo tanto, es importante considerar una calibración específica para suelos salinos y aplicar técnicas de corrección en entornos con alta salinidad.

Además, la precisión de las mediciones de las sondas de humedad del suelo puede verse afectada por la acumulación de sales y sedimentos en su superficie, lo cual altera las propiedades eléctricas del material dieléctrico utilizado en las sondas y puede generar ruidos o cambios en las medidas. Por lo cual Perumal et al. (2014), observo que la acumulación de sales y sedimentos en las sondas ocasionan errores en las mediciones de

humedad del suelo, por lo que es necesario realizar una limpieza periódica y meticulosa de las sondas para preservar la precisión de las mediciones.

En relación a los suelos orgánicos, Calderón et al. (2021) y Gómez-Plaza et al. (2019) señalan que los sensores de humedad del suelo son herramientas útiles para su monitoreo. Sin embargo, recomiendan adaptar la calibración de los sensores a las características específicas de cada suelo para obtener mediciones más precisas. Por otra parte, según Gómez-Plaza et al. (2019), destaca que los sensores capacitivos y TDR proporcionan mediciones precisas y confiables en suelos orgánicos, ya que muestran una correlación significativa con los datos de humedad del suelo obtenidos mediante técnicas de medición tradicionales.

En cuanto al análisis de resultados en función de las clases texturales del suelo, se observó que el prototipo dos tuvo una mayor precisión en las mediciones. Así como Palominos-Rizzo et al. (2022), en las pruebas realizadas con sensores de humedad del suelo en suelos arcillosos y arenosos encontraron que no había diferencias en las mediciones de acuerdo al riego aplicado, lo que demuestra que los sensores son una herramienta útil para medir el contenido de agua en estos suelos y mejorar la gestión del agua y el riego. Por otra Álvarez et al. (2020), también obtuvieron una correlación significativa entre las lecturas de los sensores y los datos de humedad del suelo obtenidos mediante técnicas de medición tradicionales. Destacan la importancia de considerar las características específicas de cada tipo de suelo al calibrar los sensores.

La variación en las mediciones también puede ser causada por el material de la sonda por sus propiedades dieléctricas. Algunos materiales tienen mayor sensibilidad a la conducción eléctrica, lo cual afecta significativamente las mediciones y la respuesta de la sonda. Por lo tanto, es importante seleccionar un material dieléctrico con propiedades estables y bien definidas, y considerar su influencia durante el proceso de calibración, como señala Robinson et al. (2003), que la variabilidad en la fabricación de las sondas puede introducir errores sistemáticos en las mediciones, según Huisman et al. (2003), destaca para interferir los errores significativos de las mediciones por las sondas requieren una calibración cuidadosa para minimizar su impacto.

La calibración y validación de los sensores, como mencionan Ascencios et al. (2020), permiten el desarrollo de sistemas de riego automatizados, confiables y seguros. Una calibración precisa mejora la capacidad de los sensores para proporcionar mediciones confiables de la humedad del suelo, según Zaman et al. (2020). Una calibración adecuada es fundamental para obtener mediciones confiables de la humedad

del suelo, como señalan Holzman et al. (2017) y Paez & Ochoa (2016). El manejo preciso de la humedad del suelo contribuye al ahorro del agua, al aumento de la eficiencia del riego y a la mejora del rendimiento y la calidad de los cultivos. Robinson & Cooper (2018) resaltan que la calibración debe ser específica para cada tipo de sensor y tener en cuenta la variabilidad espacial del suelo. Estas recomendaciones buscan mejorar el rendimiento de los sensores en aplicaciones prácticas.

Otro factor que puede afectar las mediciones de los sensores, según Mohammadi et al. (2017), son los cambios bruscos de temperatura, los cuales generan errores en las lecturas. Es importante compensar la influencia de la temperatura y aplicar técnicas de corrección para minimizar su impacto. Holmes et al. (2010) destacan que las condiciones climáticas, como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la precipitación, también influyen en las mediciones de humedad del suelo. Estas variaciones climáticas afectan las lecturas de los sensores de humedad del suelo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estas condiciones y su posible influencia en las mediciones, y aplicar técnicas adecuadas para corregir y ajustar los datos obtenidos de los sensores.

### **7.3. Validación los datos recogidos para programación de los sensores mediante la transmisión de los datos a través de una Raspberry Pi o Arduino.**

En el contexto del Internet de las cosas (IoT) con el protocolo MQTT (Sistema de comunicación máquina a máquina, por sus siglas en inglés), se aplica el monitoreo de sensores a través de una página web. Esto permite controlar los niveles de contenido de humedad del suelo y aplicar riego utilizando una representación gráfica de la información. De esta forma, es posible tener una visualización para el manejo remoto, encendiendo y apagando las electroválvulas. Arango et al. (2021) explican que mediante estas aplicaciones web es posible controlar los niveles de caudal del sistema, los niveles de contenido de humedad del suelo, y encender y apagar el sistema de riego. Además, este sistema de comunicación permite monitorear y detectar posibles errores en el funcionamiento de los sensores o en el exceso de riego. Por otra parte, Castro-Popoca et al. (2008) desarrollaron un software que cumple la función de manejo y control del riego, permitiendo un seguimiento puntual de los sensores en tiempo real.

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías avanzadas en todos los campos ha llevado a la disponibilidad de una variedad de sensores comerciales y aplicaciones en el ámbito del riego, aunque suelen ser costosos. Por esta razón, en este estudio se exploraron alternativas que permitieran, por un lado, construir sensores y, por otro lado, utilizar códigos y una página web para su manejo y aplicación, haciendo uso de software libre,

específicamente Python. Segovia-Cardozo et al. (2021) mencionan que el uso de software libre permite un seguimiento casi exacto de las lecturas de los sensores y una comunicación bidireccional para mostrar la humedad del suelo a través de una aplicación. Además, Chanchí et al. (2022) señalan que la tecnología de IoT facilita la captura, monitorización y análisis adecuado de variables climatológicas relevantes para la agricultura, y que los modelos de análisis pueden ser personalizados según las características agroclimáticas de cada cultivo. También, Nuñez-Agurto et al. (2019) explican que la tecnología IoT permite almacenar y analizar de manera centralizada y remota datos ambientales de los cultivos, lo que posibilita realizar pronósticos con mayor precisión en indicadores ambientales como la humedad y la temperatura. Por último, Martos (2012) destaca que estos sistemas requieren una planificación cuidadosa y la adopción de soluciones técnicas y prácticas adecuadas para garantizar el éxito de la implementación del IoT en el monitoreo y control del riego.

## 8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Se diseñaron y construyeron tres tipos de sensores de humedad del suelo utilizando diferentes materiales para las sondas, como acero y cobre. La elección de estos materiales se basó en su conductividad dieléctrica, la cual tuvo un impacto significativo en el rendimiento y la variabilidad de los datos obtenidos. Se observó que ciertos sensores presentaban una mayor sensibilidad a las variaciones de humedad, lo cual podría atribuirse a las propiedades de los materiales utilizados. Además, se encontró que el tipo de suelo también influía en la obtención de los datos, ya que cada tipo de suelo tiene características específicas que interactúan con los sensores de manera distinta.
- Asimismo, se determinó que los diferentes elementos utilizados en los circuitos eléctricos cumplían adecuadamente con su función de lectura para cada tipo de sensor diseñado. Esto significa que se logró obtener mediciones precisas y confiables utilizando los circuitos eléctricos correspondientes a cada sensor en particular.
- Los prototipos uno y dos desarrollados demostraron ser adecuados para el monitoreo continuo de la humedad del suelo, ofreciendo mediciones confiables y en tiempo real que se asemejan a las obtenidas con los sensores comerciales F32. Estos prototipos resultaron ser eficaces en proporcionar datos precisos y continuos sobre la humedad del suelo.
- Al comparar los resultados de las mediciones obtenidas por el prototipo uno y el prototipo dos, se observa que el prototipo uno muestra una alta presión de acuerdo al coeficiente  $R^2$  en las diferentes pruebas realizadas con diversos tipos de suelos, como suelos salinos, francos y orgánicos. Por otro lado, el prototipo dos presenta una presión menor de acuerdo al coeficiente  $R^2$  en y una mayor variación en las mediciones, especialmente en suelos arenosos, arcillosos y limosos. Esto indica que el prototipo dos es más veraces en estos tipos de suelos, proporcionando mediciones precisas y confiables de la humedad del suelo.
- Por otro lado, el prototipo tres cumplió con su función específica, que consiste en detectar si el suelo está húmedo o seco. Este tipo de sensor puede ser útil para determinar cuándo encender o apagar un sistema de riego automatizado. Sin



embargo, es importante destacar que este sensor no proporciona mediciones continuas de la humedad del suelo.

- La correcta calibración de los sensores de humedad del suelo y la validación de la precisión de las mediciones son fundamentales para lograr un monitoreo preciso y confiable de la humedad del suelo. Estos procesos son de suma importancia para verificar el rendimiento de los sensores en condiciones reales y evaluar su nivel de precisión y consistencia.
- La aplicación web "Riego UNL" proporciona una visualización sencilla de los datos enviados por los sensores, lo que facilita la detección temprana de problemas o anomalías que puedan surgir. Esto permite una respuesta rápida y eficiente ante cualquier eventualidad. Además, la aplicación permite supervisar y controlar los dispositivos de forma remota, lo que podría mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. Esta funcionalidad de control remoto brinda la posibilidad de gestionar los dispositivos a distancia, optimizando así el monitoreo y el control del sistema de riego.

## 9. Recomendaciones

Para la continuación de los estudios realizados en el presente trabajo de integración curricular se pueden plantear diversas líneas para el desarrollo de futuros estudios, además que serán muy necesarias, considerando el desarrollo acelerado para la automatización de riegos en la agricultura de precisión, entre las cuales se pueden destacar:

- Se sugiere la implementación de sensores capacitivos y resistivos adicionales que complementen las mediciones de humedad del suelo, integrándolos en el mismo módulo diseñado. Esto permitiría obtener ventajas adicionales en términos de sensibilidad, respuesta rápida, resistencia a la corrosión y una mayor cantidad de parámetros para el control del riego. La inclusión de estos tipos de sensores ampliaría la capacidad de monitoreo y brindaría una mayor precisión en la estimación de la humedad del suelo, lo que resultaría en un uso más eficiente y efectivo del agua de riego.
- Como futura línea de estudio, se propone mejorar el diseño actual de los sensores de humedad del suelo mediante la reducción de la superficie de contacto entre la sonda y el suelo. Esto se puede lograr añadiendo un material impermeable y estableciendo una separación fija entre las sondas. Estas modificaciones tendrían el potencial de reducir la variabilidad y el ruido en las lecturas de los sensores. Para llevar a cabo esta mejora, sería necesario validar los datos obtenidos y compararlos con los resultados obtenidos en el presente estudio. De esta manera, se podría evaluar la efectividad de las modificaciones propuestas en términos de la precisión y consistencia de las mediciones de humedad del suelo.
- Como línea de estudio adicional, se propone comparar la eficacia de diferentes materiales para la construcción de sensores: En lugar de utilizar los materiales utilizados en el estudio anterior, se podrían probar diferentes alternativas materiales para construir los sensores de humedad del suelo y comparar su eficacia y precisión en la medición de la humedad del suelo. De tal manera, se podrían identificar materiales que mejoren las características de los sensores, como la sensibilidad, la durabilidad y la resistencia a factores ambientales adversos.
- Es de vital importancia llevar a cabo evaluaciones de durabilidad, mantenimiento y aplicación en campo abierto de los sensores. Esto implica realizar pruebas de medición en condiciones no controladas, considerando diferentes tipos de suelos

y exposición a diversas condiciones ambientales. Además, es necesario evaluar la vida útil de los sensores en estas condiciones reales. Estas evaluaciones permitirán determinar la resistencia de los sensores ante factores externos, como la humedad, la temperatura, la corrosión y otros elementos que puedan afectar su funcionamiento y precisión a largo plazo.

- Identificar los requisitos de mantenimiento necesarios para garantizar un rendimiento óptimo de los sensores en el campo. Estas pruebas y evaluaciones son esenciales para validar la eficacia y confiabilidad de los sensores en aplicaciones prácticas y asegurar su uso efectivo en el monitoreo de la humedad del suelo en entornos reales.

## 10. Bibliografía

- Abraha, M., & Savage, M. J. (2015). Importance of calibration for soil moisture sensors used in agricultural production. *Agricultural Water Management*, 158, 112-120.
- Álvarez, D., Parra, M., & Silva, P. (2020). Aplicación del Internet de las Cosas (IoT) en el monitoreo y control del riego. *Revista Chilena de Ingeniería*, 31(1), 86–94.
- Arango, A., Ascencios, D., Meza, K., & Pino, E. (2021). Efecto de la frecuencia de riego en la calidad del césped americano utilizando sistema de riego por goteo subterráneo controlado vía internet. 39(3), 21–31. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292021000300021&lang=es](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292021000300021&lang=es)
- Ascencios, D., Meza, K., Lluen, J., & Simon, G. (2020). Calibración, validación y automatización del sistema de riego por goteo subterráneo usando un microcontrolador Arduino. 22(1), 95–105. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2313-29572020000100095&lang=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572020000100095&lang=es)
- Banco Mundial. (2017). El agua en la agricultura. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#3>
- Betancourth Castro, L., & Fernando Jiménez, A. (2016). Sensor de humedad del suelo tipo sonda con sistema de monitoreo para aplicaciones en agricultura de precisión. [https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/1184/runillanos\\_ele\\_0373\\_sensor\\_de\\_humedad\\_del\\_suelo\\_tipo\\_sonda\\_con\\_sistema\\_de\\_monitoreo\\_para\\_aplicaciones\\_en\\_agricultura\\_de\\_precision\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/1184/runillanos_ele_0373_sensor_de_humedad_del_suelo_tipo_sonda_con_sistema_de_monitoreo_para_aplicaciones_en_agricultura_de_precision_.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bravo, V. P. (2017). Evaluación de un sistema “vbm384” para la aplicación práctica de internet de las cosas iot, en el monitoreo automático de la humedad y temperatura del suelo [Tesis del título de magister, Universidad de Cuenca] Repositorio Académico de la Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28223>
- Cabrera-Moreira, S., Concepción-Bonachea, N., Batista-Charles, O, J., Palmero-Venegas, I. (2018) Calibración de sonda reflectométrica para la estimación de la humedad de suelos ferralíticos rojos *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(3). <https://www.redalyc.org/journal/932/93256706005/movil/>
- Caldas, R. R., Fernandes, D. D., & Filho, P. H. G. (2020). Low-cost soil moisture sensors for precision agriculture. *Journal of Applied Geodesy*, 2(14), 153–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1025/j.measurement.2019.107052>

- Calderón, S., Centella, M., Samaniego, M., & Collado, E. (2021). Sistema de riego basado en controlador PID para la adecuación de la humedad del suelo en invernaderos. *Revista de Iniciación Científica*, 7(1), 9–15. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.1.3041>
- Castro, M., Águila, M., Quevedo, A., Kleisinger, S., Tijerina, L., & Mejía, E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura Técnica En México*, 34(4), 459–470.
- CEPAL. (2011). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación. Seminarios y Conferencias*, 65, 120.
- Chamba Zaragocín, Diego Fernando (2020). Caracterización hidráulica del riego por goteo a partir de ensayos en ramales y unidades para su proyecto y gestión económica. [Tesis Doctoral, E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM) ]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65540>.
- Chanchí, G.-E., Ospina, M.-A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(2), 257–271. <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- Chavarria, G., & dos Santos, H. P. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. *Advances in Selected Plant Physiology Aspects. INTECH*, 1(1), 3-39. <https://doi.org/10.5772/33478>
- Cornejo-Velazquez, E., Romero-Trejo, H., Acevdo-Sandoval, O., & Toriz-Palacios, A. (2019). Internet de las Cosas (IoT) para el Sector Agrícola. *Padi*, 7(13), 62–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.4403>
- Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. W. (2017). Understanding Soil Water Content and Thresholds For Irrigation Management. *Oklahoma cooperative extension service*, 1(3), 2-9. [https://www.researchgate.net/publication/317501722\\_Understanding\\_Soil\\_Water\\_Content\\_and\\_Thresholds\\_For\\_Irrigation\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/317501722_Understanding_Soil_Water_Content_and_Thresholds_For_Irrigation_Management)
- Demin, P. E. (2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 1(1), 5-24.
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *In Journal of Hydrology* 458–459, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
- Domínguez Soto, J. M., Román Gutiérrez, A. D., Prieto García, F., & Acevedo Sandoval,

- O. (2012). *Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos \* Munsell Notation System and CIELab as a tool for evaluation colors in soils Resumen.*
- Eitel, J. U., Long, D. S., & Gessler, P. E. (2017). Early season soil moisture and NDVI responses to altered precipitation patterns in a shrub-steppe ecosystem. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62, 92-99.
- Enciso, J., Porter, D., & Péries, X. (2018). Uso de sensores de humedad en suelo para mejorar el manejo del riego en cultivos de invernadero. *Mejora En La Eficiencia Del Uso de Agua y Fertilizantes En Agricultura*, 39(5), 107–132. <https://aglifesciences.tamu.edu/baen/wp-content/uploads/sites/24/2017/01/E-618S-Irrigation-Monitoring-with-Soil-Water-Sensors.-Spanish-Version.pdf>
- FAO, (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016). Propiedades Físicas del suelo. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO. (1997). Agricultura mundial hacia los años 2015/2030. *Food Policy*, 22(1), 101–103. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Fathy, C., & Hassan M, A. (2023). A Secure IoT-Based Irrigation System for Precision Agriculture Using the Expeditionary Cipher. *Sensors*, 23(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s23042091>
- Ferrándiz Molina, J., & Puerto Molina, H. (2017). “Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad.”
- Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(5), 1–14.
- Fuentes Yagüe, J. L. (1991). Características agronómicas del riego por goteo. *Ministerio de agricultura pesca y alimentación, Madrid*. 1(2), 7-24.
- Gale, W. J., Cambardella, C. A., & Bailey, T. B. (2000a). Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci.* 201–207.
- Gale, W. J., Cambardella, C. A., & Bailey, T. B. (2000b). Surface residue-and root-derived carbon in stable and unstable aggregates. *Soil Sci.* 196-201.
- García, E. (2012). Detector humedad o nivel de agua. <https://www.youtube.com/watch?v=wGNqUCyqbyY>

- García, J. R., Sosa, F., & Juan Fernández de, U. (2012). *El Agua del Suelo*. Cátedra de Edafología Facultad de Agronomía y Zootecnia Universidad Nacional de Tucumán.
- Gimenez, R. (2013). *Física del Suelo*. 16. file:///C:/Users/eduar/Downloads/Fisica del Suelo.pdf
- Gómez-Plaza, A., Robles-Medina, A., Castillo-Llanque, F., López-Fernández, S., & Testi, L. (2019). Evaluation of soil moisture sensors in organic vineyards. *Sensors*, *19*(23), 5191.
- Gutiérrez-Guzmán, U. N., Ríos-Vega, M. E., Núñez-Hernández, G., Esquivel-Romo, A., Vázquez-Navarro, J. M., & Anaya-Salgado, A. (2022). Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *28*, 263–273. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3281>
- Hernández, M. C. (2019). Manual de entrenamiento de televisores LCD SANYO: Funcionamiento de la pantalla LCD.
- Holmes, T. R., Zegelin, S. J., & Reeder, R. C. (2010). Factors affecting soil moisture sensor accuracy and best practice recommendations. *Agronomy Journal*, *102*(5), 1463-1472.
- Holzman, M., Rivas, R., Carmona, F., & Niclòs, R. (2017). A method for soil moisture probes calibration and validation of satellite estimates. *MethodsX*, *4*, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2017.07.004>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). (2015). Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas INIA Tacuarembó 20 de mayo de 2015. Inia, 19.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, *55*(407), 2427-2436.
- Konijnenburg, A. (2006). Agricultura orgánica El suelo: sus componentes físicos. In Estacion Experimental Agropecuaria (Vol. 1). [https://www.ciaorganico.net/documypublic/498\\_script-tmp-inta\\_material\\_didactico\\_nro\\_01\\_\(1\).pdf](https://www.ciaorganico.net/documypublic/498_script-tmp-inta_material_didactico_nro_01_(1).pdf)
- Lafebre, G. (2019). Uso o del ProjecttBoard, ProtoBoard, BreadBoard. 9–25.
- Lanfranco, J. W., Pellegrini, A., & Cattani, V. M. (2020). Contenidos de Edafología Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo. In Contenidos de edafología. <https://doi.org/10.35537/10915/37325>

- Liotta, M., Daniel, S., Juan, G., & Sergio, M. (2015). Drenaje De Suelos Para Uso Agrícola. Manual de Capacitación: Drenaje de Suelos Para Uso Agrícola, 1, 10–11.  
[https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_manual\\_drenaje\\_de\\_suelos\\_para\\_uso\\_agricola.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_drenaje_de_suelos_para_uso_agricola.pdf)
- Lloret, J., Sendra, S., Garcia, L., & Jimenez, J. M. (2021). A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. *Sensors*, 21(21).  
<https://doi.org/10.3390/s21217243>
- López-Urrea, R., Meliá, J., & Martínez-Cob, A. (2019). Calibration of soil moisture sensors: A review. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-22.
- Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J., Del Valle Panigua, D., Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. (2011). Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(5), 659–672. <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263121118003.pdf>
- Magán, H., Vidal, S., Barriga, A., Ceballos-Cáceres, J., Linares-Barranco, B., Moragutiérrez, J. M., & Ramos-Martos, J. (2016). Sensor de humedad del suelo de bajo coste para control de regadíos. Instituto de Microelectrónica de Sevilla.  
<https://www.ina.gob.ar/archivos/pdf/CRA-IIIFERTI/CRA-RYD-30-Vita.pdf>
- Martin, E., & Munoz, C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? Extensión Cooperativa de La Universidad de Arizona, AZ1220s, 8. <http://hdl.handle.net/10150/625275>
- Martin, L. (2020). Construcción de un sensor de humedad de suelo.  
<https://www.automatismos-mdq.com.ar/blog/2020/11/construccion-de-un-sensor-de-humedad-de-suelo.html>
- Martínez, D. G. (2016). Diseño de Sensores de Humedad de Suelo Basados en Técnicas de Flectometría de la Frecuencia (FDR). In Universidad Politécnica de Cartagena.
- Martos, A. (2012). Diy detector humedad plantas.  
<https://sites.google.com/site/arduinoreciclar/detector-humedad-plantas>
- Miralles, D. G., Jiménez, C., & Jung, M. (2016). Using satellite soil moisture data to evaluate model estimates of plant transpiration. *Remote Sensing of Environment*, 186, 165-175.



- Mohammadi, M., Afzalnia, S., & Sarmadian, F. (2017). Influence of temperature changes on the readings of soil moisture sensors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(10).
- Molera Marimón, J., & Llitjós Viza, A. (1995). Estudio de cuatro adaptaciones escolares de métodos de observación y determinación de textura del suelo.
- Muñoz Arboleda, F. (2009). Importancia del agua en la nutrición de los cultivos. *Cenicana*, 31(3), 16–18. [www.cenicana.org](http://www.cenicana.org)
- Núñez-Agurto, D., Benavides-Astudillo, E., Rodríguez, G., & Salazar, D. (2019). Propuesta de una plataforma de bajo costo basada en Internet de las Cosas para Agricultura Inteligente. *Revista Cumbres*, 6, 53–66. <http://investigacion.utmachala.edu.ec/revistas/index.php/Cumbres>
- Paez, A., & Ochoa, D. (2016). Calibration and validation of soil moisture sensors under laboratory and field conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 163–174.
- Palominos-Rizzo, T., Villatoro-Sánchez, M., Alvarado-Hernández, A., Cortés-Granados, V., & Paguada-Pérez, D. (2022). Estimation of soil moisture through multiple linear regressions in Llano Brenes, Costa Rica. *Agronomia Mesoamericana*, 33(2). <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47872>
- Pérez, B., Koo, J., Garcia, F., & Carmona, J. (2014). Automatización, monitoreo y control remoto de un sistema de riego agrícola con código abierto. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 12th(April), 1–9. <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP132.pdf>
- Ramos-Carbajal, E., Martínez-Radríguez, A., García de la Figal-Costales, A., & Hernández-Cuello, G. (2020). *Correlation between Density and Mechanical Resistance of Soil Obtained with Probes of Different Geometries Correlación entre densidad y resistencia mecánica del suelo obtenida con sondas de diferentes geometrías*. 29(3), 28–36. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542020000300028&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542020000300028&lang=es)
- Robinson, D. A., Jones, S. B., & Friedman, S. P. (2003). A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. 10(1), 444–475. <https://doi.org/10.2113/2.4.444>

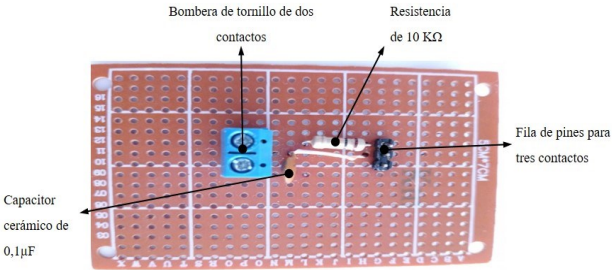
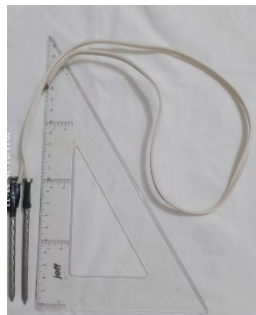
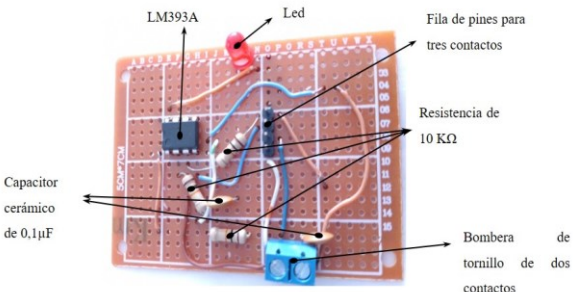
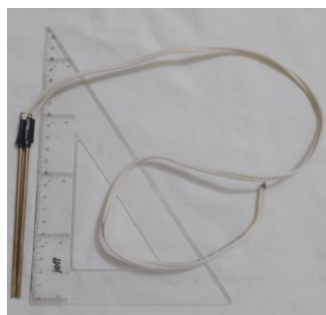
- Robinson, D. A., Jones, S. B., Lebron, I., & Reinsch, T. G. (2018). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, *17*(1), 1-22.
- Robinson, D., & Cooper, J. (2018). Calibration and performance of soil moisture sensors. *A Review. Geoderma*, *311*, 1–13.
- Sánchez del Río, C. (1998). Guión Practica Para La Realización De La Medida Y El Calculo De Fallos. Universidad Carlos III de Madrid, 8, 50.
- Sánchez Torres, J. D. (2011). Efecto del exceso de agua en el suelo y la fisiología de la planta de banano. November 2011, 11. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35358.54085>
- Santos, H. (2021). Curso de Arduino. Proyecto sensor de humedad del suelo anti corrosión. [https://www.youtube.com/watch?v=GffsZsL\\_MsU](https://www.youtube.com/watch?v=GffsZsL_MsU)
- Santos, R., & Santos, S. (2009). Learn Esp32 with Arduino IDE.
- Schugurensky, C., & Capraro, F. (2013). Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo Carlos. Instituto de Automática (INAUT). Universidad Nacional de San Juan. [https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Schugurensky/publication/228374116\\_Control\\_automatgico\\_de\\_riego\\_agricola\\_con\\_sensores\\_capacitivos\\_de\\_humedad\\_de\\_suelo\\_Aplicaciones\\_en\\_vid\\_y\\_olivo/links/02e7e52b0d15b0b2de000000/Control-automatgico-de-riego-agricol](https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Schugurensky/publication/228374116_Control_automatgico_de_riego_agricola_con_sensores_capacitivos_de_humedad_de_suelo_Aplicaciones_en_vid_y_olivo/links/02e7e52b0d15b0b2de000000/Control-automatgico-de-riego-agricol)
- Segovia-Cardozo, D. A., Franco, L., & Provenzano, G. (2022). Detecting crop water requirement indicators in irrigated agroecosystems from soil water content profiles: An application for a citrus orchard. *Science of the Total Environment*, *806*, 150492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150492>
- Segovia-Cardozo, D. A., Rodríguez-Sinobas, L., Canales-Ide, F., & Zubeizu, S. (2021). Design and field implementation of a low-cost, open-hardware platform for hydrological monitoring. *Water (Switzerland)*, *13*(21). <https://doi.org/10.3390/w13213099>
- Selectro. (2020). Guía para los principiantes sobre los módulos relé en proyectos Arduino. <https://solectroshop.com/es/blog/guia-para-principiantes-sobre-modulos-de-reles-en-los-proyectos-de-arduino-n28>
- Silva, P., Matos, J., & Pereira, L. (2016). Low-cost sensors for soil moisture monitoring. *Procedia Engineering. Sensors*, *159*, 176–183. <https://doi.org/10.3390/s20226515>

- Šimůnek, J., & Van Genuchten, M. T. (2018). Calibrating soil water retention and hydraulic conductivity functions: Toward a general procedure. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-10.
- Soto, R. A., Vanegas Chacón, E. A., & García Álvarez, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 41–46. <http://edis.ifas.ufl.edu/ae266>
- Thido Electrónica, I. (2013). Sensor de Humedad del Suelo FC-28 Higrómetro.
- Thompson, R., & Gallardo, M. (2018). Remote sensing of soil moisture: a review. *Journal of Hydrology*, 556, 472-488.
- Valencia Villegas, Y., & Sepúlveda Casadiego, Y. (2019). Implementación de sensores en los sistemas de riego automatizado.
- Valipour, M. (2014). Soil Water Constants. Irrigation Engineering. <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124843>
- Vasquez, A., Vasquez, I., Vasquez, C., & Cañamero, M. (2017). Fundamentos de Ingeniería de Riego.
- Vásquez-Bermúdez, M. J., Hidalgo-Larrea, J. W., & Salavarría-Melo, J. O. (2023). Monitoreo IoT en un Sistema Aeropónico para el cultivo de la Lechuga Orgánica IoT. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 380–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.618>
- Vaz, C. M. P., Basso, L. H., & Hopmans, J. W. (2001). Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. 35–42.
- Villablanca, A., Cajías, E., & Allende, M. (2014). Uso E Instalación De Tensiómetros. 1–2. <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR40242.pdf>
- Vita Serman, F., Schugurensky, R., Carrión, R., & Rodríguez, S. (2012). Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo del tipo (fdr) de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo. 1. Instituto de Automática de la Facultad de Ingeniería, U.N. San Juan. <https://www.ina.gob.ar/archivos/pdf/CRA-IIIFERTI/CRA-RYD-30-Vita.pdf>
- Vital Carrillo, M. (2021). Introducción de Arduino. *Revista*, 9(17), 4–8.
- Zaman, Q., Ahmad, M., & Iqbal, A. (2020). Calibration and validation of soil moisture sensors for precision agriculture. *Journal of Integrative*, 19(3), 579–589.

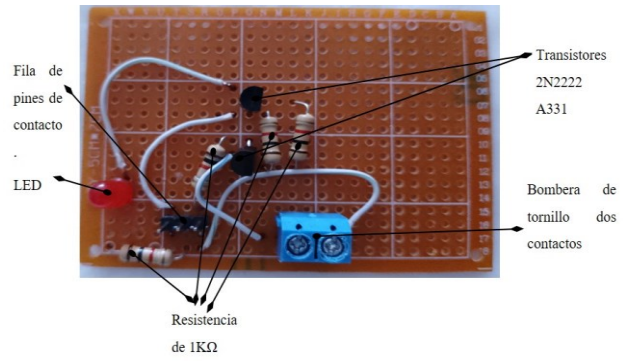
- Zemni, N., Bouksila, F., Persson, M., Slama, F., Berndtsson, R., & Bouhlila, R. (2019). Laboratory Calibration and Field Validation of Soil Water Content and Salinity Measurements Using the 5TE Sensor. *Sensors*, *19*(23), 5272. <https://doi.org/10.3390/s19235272>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo. 1–4. <http://edis.ifas.ufl.edu/ae266>

## 11. Anexo

Anexos 1. Parte del circuito eléctrico de prototipos de los sensores.

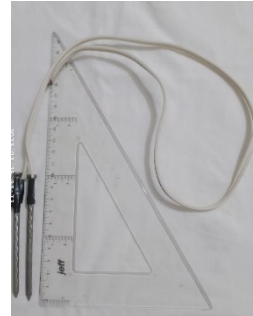
Prototipos de sensores	Partes de sensores	Especificaciones
Uno	Circuito eléctrico	
	Sonda	
Dos	Circuito eléctrico	
	Sonda	

Circuito eléctrico



Tres

Sonda



**Anexos 2.** Costo de la construcción de los prototipos de sensores.

a) Prototipo uno.

N°	Detalle	Precio unitario (\$)	Precio total
<b>Costo de materiales</b>			
1	Resistencia de 10kΩ 1/4 W	0,05	0,05
1	Capacitor cerámico de 0,1μF	0,15	0,15
1	Baquela	0,3	0,3
1	Bombero de tornillo de dos contactos	0,15	0,15
1	Fila de pines para tres contactos	0,25	0,25
2	Cables Jumper hembra macho	0,05	0,1
2	Cables Jumper hembra hembra	0,05	0,1
1	Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm <sup>2</sup> ) de 300V	0,4	0,4
2	Varillas de cobre de 15 cm	0,25	0,5
	Subtotal		2
<b>Costo de mano de obra</b>			
	Costo de mano de obra		0,5
	Subtotal		0,5
	<b>Total del costo del sensor</b>		<b>2,5</b>

**b) Prototipo dos.**

<b>N° Detalle</b>	<b>Precio unitario (\$)</b>	<b>Precio total</b>
<b>Costo del materiales</b>		
1 Resistencia de 10k $\Omega$ 1/4 W	0,05	0,05
1 LM393	0,75	0,75
2 Capacitor cerámico de 0,1 $\mu$ F	0,15	0,30
1 Baquela	0,30	0,30
1 Bombera de tornillo de dos contactos	0,15	0,15
1 Fila de pines para tres contactos	0,25	0,25
2 Cables Jumper hembra macho	0,05	0,10
Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm2) de		
1 300V	0,40	0,40
2 Varillas de cobre de 15 cm	0,18	0,36
1 Diosled	0,05	0,05
2 Cables Jumper hembra hembra	0,05	0,10
	Subtotal	2,81
<b>Mano de obra</b>		
Costo de mano de obra		0,70
	Subtotal	0,70
<b>Total del costo del sensor</b>		3,51

**c) Prototipo tres.**

<b>N° Detalle</b>	<b>Precio unitario (\$)</b>	<b>Precio total</b>
<b>Costo del materiales</b>		
7 Resistencia de 10k $\Omega$ 1/4 W	0,05	0,35
2 Transistores	0,15	0,3
1 Baquela	0,3	0,3
1 Bombera de tornillo de dos contactos	0,15	0,15
1 Fila de pines para tres contactos	0,25	0,25
2 Cables Jumper hembra macho	0,05	0,1
Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm2) de		
1 300V	0,40	0,4
2 Calvos de acero de 10 cm	0,18	0,36
1 Diosled	0,05	0,05
2 Cables Jumper hembra hembra	0,05	0,1
	Subtotal	2,36
<b>Mano de obra</b>		
Costo de mano de obra		0,59
	Subtotal	0,59
<b>Total del costo del sensor</b>		2,95

### Anexos 3. Parte de código para probar los sensores.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Se coloca el numero de las columnas y filas de la LCD
int lcdColumns = 20;
int lcdRows = 4;
#define TIME_DELAY 2000
// Se va determinando los pines analogicos para lo sensores
const int sensorPin = 26;
const int sensorPin1 = 34;
const int sensorPin2 = 32;
const int sensorPin3 = 33;
const int sensorPin4 = 25;
String nameSensor = "Sensor1";
String nameSensor2 = "Sensor2";
String nameSensor3 = "Sensor3";
String nameSensor4 = "Sensor4";
String nameSensor5 = "Sensor5";
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 4 // Conectar al pin ESP-32 GPIO 4
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
char mensaje[500] = "";
int env_msg_delay = millis();
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("DHTxx test!");
  dht.begin();
  // initialize LCD
  lcd.init();
  // turn on LCD backlight
  lcd.backlight();
}

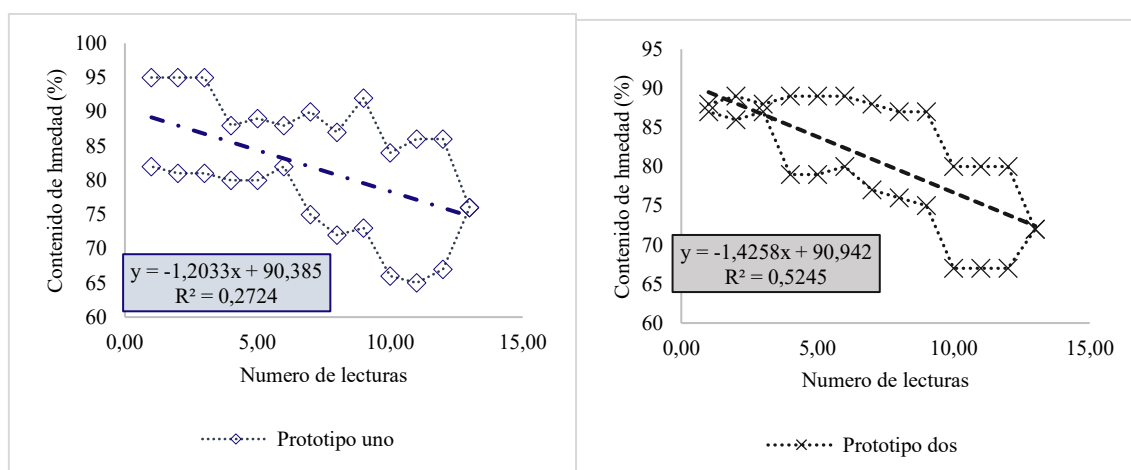
void getDataSensorMoisture(int sensorPinGPIO, String nameSensorIn)
{
  int moisturePercentage = analogRead(sensorPinGPIO);
  if (millis() - env_msg_delay > TIME_DELAY)
  {
    moisturePercentage = map(moisturePercentage, 0, 4095, 100, 0);
    lcd.setCursor(0, 0);
    // COnfiguracion sensor 0= sensorpin
    String shs = nameSensorIn + " = " +
String((float)moisturePercentage);
    Serial.print("Sembrio Saturado ");
    Serial.print(moisturePercentage);
    Serial.println("%");
    lcd.print(shs);
    delay(10);
    lcd.clear();
  }
}
```



**Anexos 4.** Prueba de los sensores en suelos francos.

Maceta	Volumen de agua (ml)	Contenido de humedad	Prototipo			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1,5	21	18	No	2	2	0
2	0	1,5	16	14	No	2	3	1
3	0	1,5	15	13	No	1	1	1
1	50	6,9	48	57	Si	47	64	61
2	50	7,3	47	58	Si	51	67	61
3	50	7,1	47	58	Si	49	66	61
1	100	12	64	78	Si	67	69	70
2	100	12,7	63	78	Si	67	70	70
3	100	12,4	63	78	Si	68	70	70
1	150	17,1	83	89	Si	80	82	77
2	150	17,8	82	89	Si	79	81	75
3	150	17,6	81	89	Si	78	79	74
1	200	22,6	85	90	Si	84	79	80
2	200	23,1	84	89	Si	83	76	77
3	200	23	84	89	Si	82	74	76
1	250	27,6	92	92	Si	85	80	81
2	250	28,4	91	91	Si	86	81	80
3	250	28,8	90	89	Si	85	82	82
1	300	32,6	88	95	Si	84	77	78
2	300	33,4	89	95	Si	79	78	78
3	300	33,8	88	95	Si	81	75	75

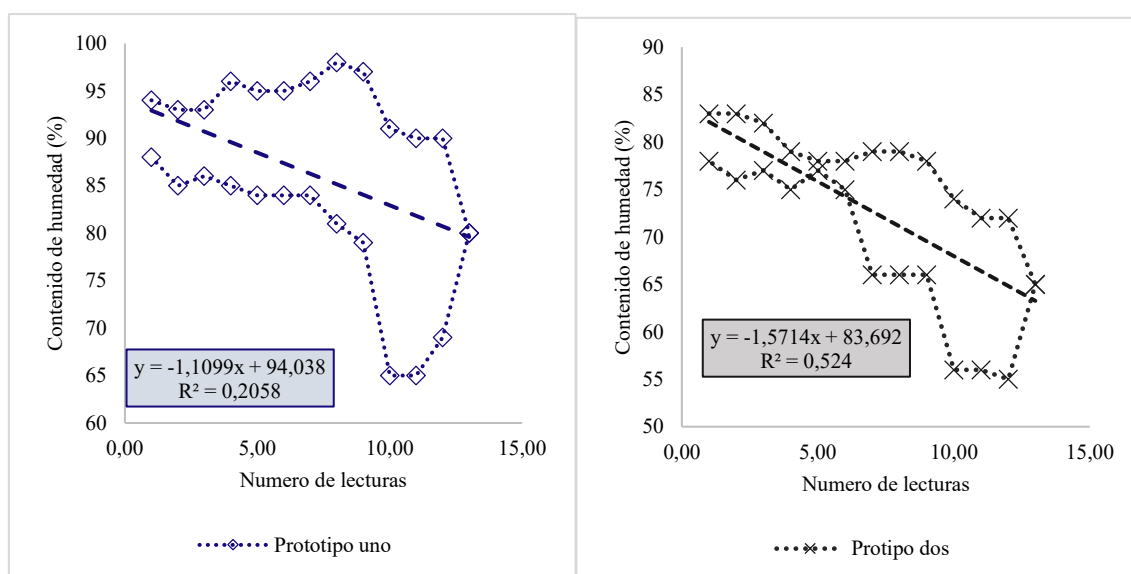
**Anexos 5.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos francos.



**Anexos 6.** Prueba de los sensores en suelos salino.

Maceta	Volumen de agua (ml)	Peso de maceta en húmedo	Prototipo 1			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1015	0	0	No	15	15	15
2	0	1015	2	0	No	14	13	14
3	0	1015	2	1	No	13	13	13
1	50	1070	61	56	Si	53	52	49
2	50	1069	60	56	Si	53	51	49
3	50	1069	57	55	Si	52	51	48
1	100	1120	68	74	Si	65	70	64
2	100	1122	68	74	Si	64	68	63
3	100	1120	68	74	Si	64	67	65
1	150	1175	79	83	Si	77	71	75
2	150	1178	76	86	Si	75	71	73
3	150	1171	76	86	Si	73	70	72
1	200	1226	86	90	Si	76	74	78
2	200	1231	85	88	Si	71	73	77
3	200	1226	83	90	Si	73	70	77
1	250	1278	88	94	Si	77	77	74
2	250	1282	88	94	Si	76	77	78
3	250	1280	87	91	Si	75	76	79
1	300	1328	83	94	Si	88	81	90
2	300	1332	83	93	Si	92	92	90
3	300	1330	82	93	Si	88	81	90

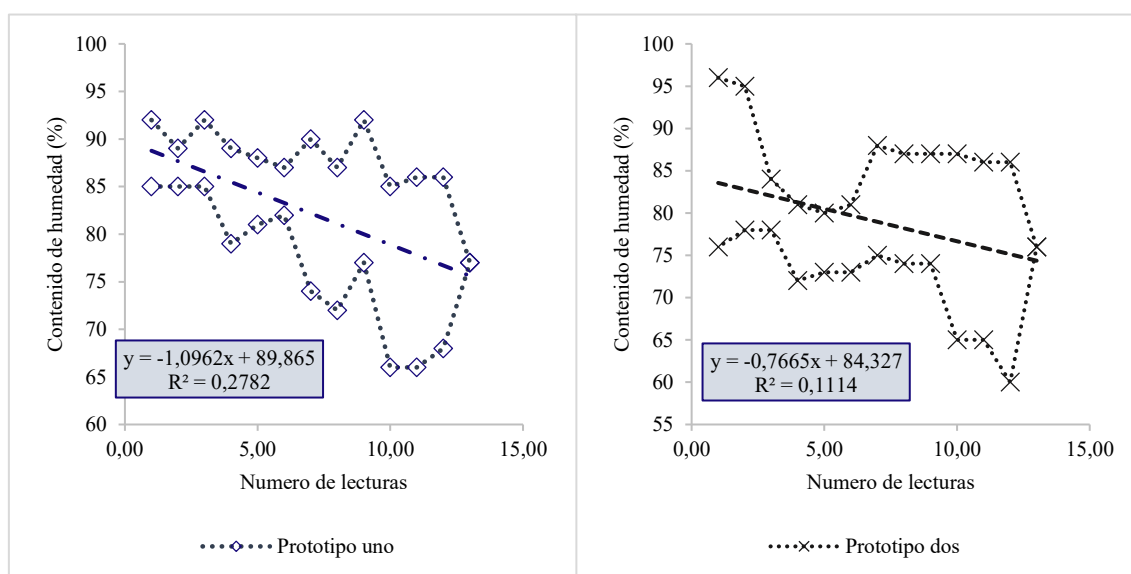
**Anexos 7.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos francos.



**Anexos 8.** Prueba de los sensores en suelos orgánicos.

Maceta	Volumen de agua (ml)	Contenido de humedad	Prototipo 1			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1,5	7	2	No	1	0	0
2	0	1,5	8	2	No	1	1	1
3	0	1,5	7	3	No	2	1	0
1	50	6,5	58	43	Si	58	38	51
2	50	6,5	58	45	Si	54	30	52
3	50	6,5	57	45	Si	55	30	51
1	100	12	77	77	Si	68	59	54
2	100	11,8	74	76	Si	67	59	55
3	100	11,8	73	76	Si	66	59	58
1	150	17,4	78	84	Si	79	73	75
2	150	16,7	78	87	Si	79	72	74
3	150	16,9	78	81	Si	79	71	73
1	200	22,4	83	92	Si	77	79	73
2	200	21,9	86	93	Si	77	79	78
3	200	22,3	81	91	Si	77	78	78
1	250	27,8	91	95	Si	84	81	81
2	250	26,9	90	94	Si	82	79	77
3	250	28,1	92	93	Si	80	79	76
1	300	32,8	96	92	Si	83	88	85
2	300	31,9	95	89	Si	80	79	83
3	300	33,1	84	92	Si	77	77	82

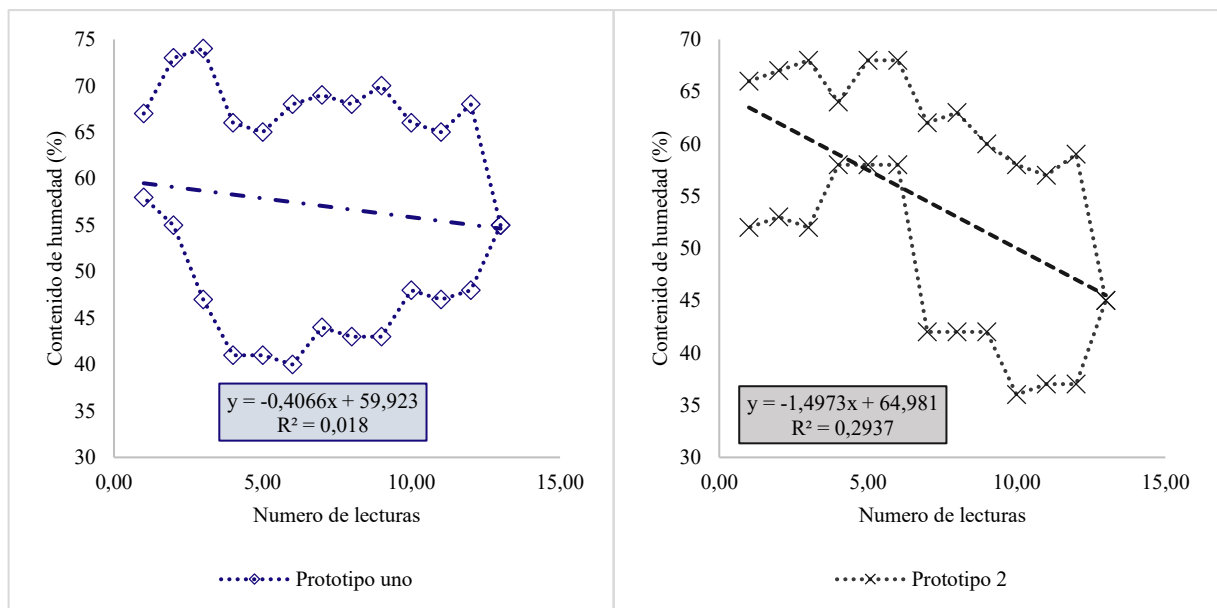
**Anexos 9.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos orgánicos.



**Anexos 10.** Prueba de los sensores en suelos arcilloso.

Maceta	Porcentaje (%)	Contenido de humedad	Prototipo 1			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1,50	3	10	No	0	0	0
2	0	1,50	8	8	No	0	2	1
3	0	1,50	8	8	No	0	1	2
1	50	7,10	24	24	Si	20	29	27
2	50	6,90	19	16	Si	27	22	27
3	50	7,10	17	14	Si	23	24	20
1	100	12,10	54	61	Si	59	54	57
2	100	11,90	50	52	Si	51	53	50
3	100	12,10	42	57	Si	50	41	56
1	150	16,60	57	64	Si	53	54	53
2	150	16,00	56	65	Si	52	54	52
3	150	16,30	55	68	Si	47	52	50
1	200	21,00	66	67	Si	55	55	55
2	200	20,50	67	73	Si	56	54	55
3	200	22,00	68	74	Si	54	53	55

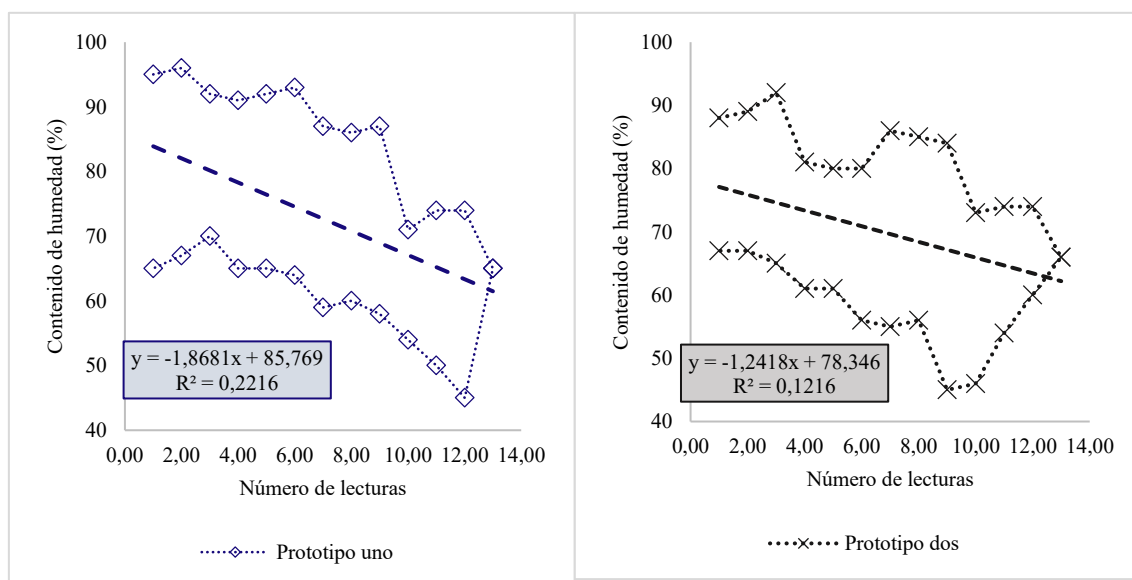
**Anexos 11.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos arcilloso.



**Anexos 12.** Prueba de sensores en suelos limoso.

Maceta	Porcentaje (%)	Contenido de humedad	Prototipo 1			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1,50	7	7	No	0	4	4
2	0	1,50	1	1	No	3	5	5
3	0	1,50	3	2	No	4	3	6
1	50	7,10	42	72	Si	38	34	44
2	50	7,80	45	54	Si	46	32	48
3	50	7,30	46	57	Si	41	33	52
1	100	12,10	67	83	Si	66	73	73
2	100	12,80	66	78	Si	65	66	69
3	100	12,30	68	78	Si	63	69	68
1	150	16,60	74	78	Si	66	68	69
2	150	17,30	72	80	Si	65	68	69
3	150	16,80	72	82	Si	65	69	68
1	200	22,80	77	81	Si	66	68	68
2	200	22,60	76	80	Si	67	68	68
3	200	21,70	76	81	Si	67	68	68

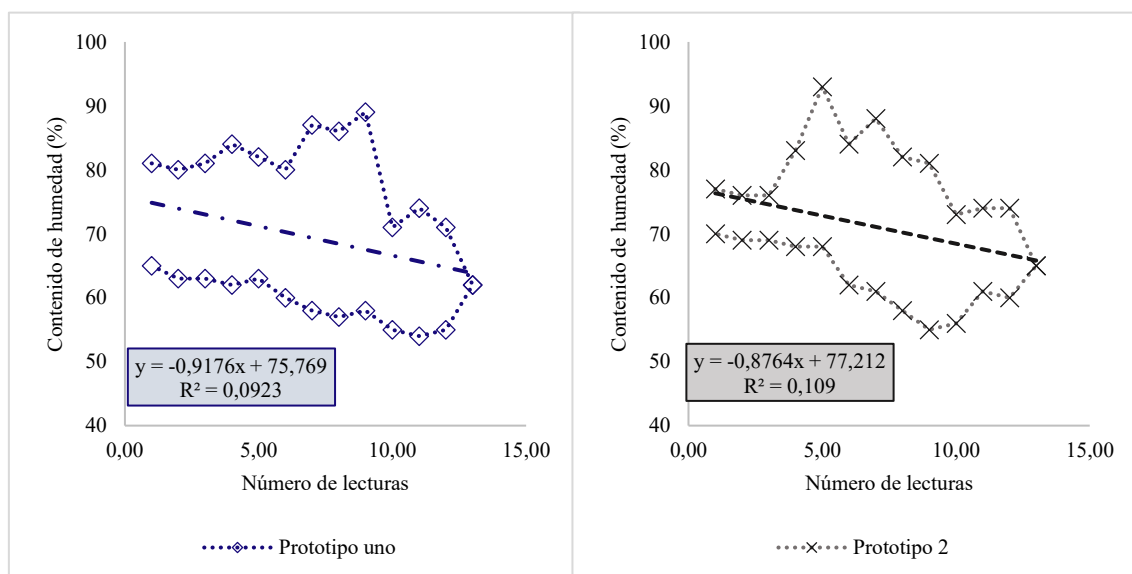
**Anexos 13.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos arenoso.



**Anexos 14.** Prueba de sensores en suelos arenosos.

Maceta	Porcentaje (%)	Contenido de humedad	Prototipo 1			"Sensor Fc-28"		
			Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1
			Prototipo 2	Prototipo 1	Prototipo 3			
1	0	1,50	1	0	No	2	2	2
2	0	1,50	1	1	No	2	1	2
3	0	1,50	1	1	No	1	2	1
1	50	7,00	62	65	Si	65	65	61
2	50	6,00	61	72	Si	63	67	71
3	50	6,80	61	77	Si	65	68	72
1	100	12,50	71	77	Si	70	72	75
2	100	10,90	70	85	Si	69	71	76
3	100	11,00	69	82	Si	68	70	75
1	150	17,50	86	93	Si	68	72	75
2	150	15,90	85	92	Si	68	72	74
3	150	15,80	85	92	Si	68	71	73
1	200	22,50	88	95	Si	74	78	70
2	200	20,90	89	96	Si	73	74	71
3	200	20,80	92	92	Si	72	74	71

**Anexos 15.** Histéresis de los prototipos de sensores en suelos limoso.



## Anexos 16. Parte del código para el funcionamiento de los sensores en el aplicativo.

```
#include <Arduino.h>
#include "PubSubClient.h"
#include "WiFi.h"
#define TIME_DELAY 2000
/**
 * Inicializer ports
 */
const int sensorPing = 26;
const int sensorPing1 = 34;
const int sensorPing2 = 32;
const int sensorPing3 = 33;
const int sensorPing4 = 25;

String dataSensor, dataSensor1, dataSensor2, dataSensor3,
dataSensor4;
*/
const char *ssid = "WILSON"; // Nombre de la red del sembrío
const char *wifi_password = "0750180896"; // Contraseña de la red

const char *mqtt_server = "64.227.XXXXX"; // Direccion Ip del Broker
o Raspberry Pi
const char *humedytySolid_topic = "suelo1";
const char *humedytySolid_topic1 = "suelo2";
const char *humedytySolid_topic2 = "suelo3";
const char *humedytySolid_topic3 = "suelo4";
const char *humedytySolid_topic4 = "suelo5";
const char *mqtt_username = "rXXXo"; // Nombre del Usuario del MQTT
configurado en el broker
const char *mqtt_password = "XXX"; // Nombre del Contraseña del
MQTT configurado en el broker
const char *clientID = "riegoSensor";
const int mqtt_port = 1883;
int getDataSensors(int sensorGpio)
{
    int moinsturePercentage;
    if (millis() - env_msg_delay > TIME_DELAY)
    {
        moinsturePercentage = analogRead(sensorGpio);
        moinsturePercentage = map(moinsturePercentage, 0, 4095, 100, 0);
        Serial.print(" Moisture soil");
        Serial.print(moinsturePercentage);
        Serial.println("%");
    }
    return moinsturePercentage;
}
```



# **Manual de operacionalización de la página web**

**“Sistema de Riego  
UNL”**







## Presentación de la página web

La página web de "Riego UNL" se construyó con finalidad de mostrar el estado de los sistemas de riego automatizado mediante el monitoreo de los sensores de humedad del suelo de acuerdo a las características físicas del suelo controlando el caudal de riego aplicado, el presente manual explica de forma sencilla y detallada la estructura y funcionamiento de la página web Riego UNL, con la finalidad de poder controlar y monitorear de forma remota los sensores de humedad, el encendido y apagado para la aplicación del riego automatizado. La tecnología de automatización de riego está diseñada para que sea controlada a través de un smartphone o computadora, lo que representaría a los encargado y usuario tener un manejo adecuado a la hora de regar.

### **Objetivos de la página web**

El manual de la página web de riego tiene los siguientes objetivos:

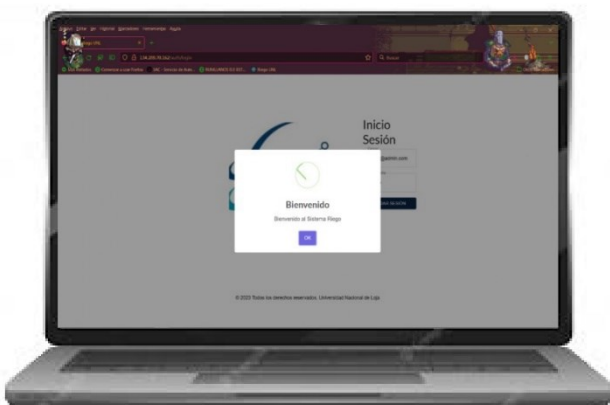
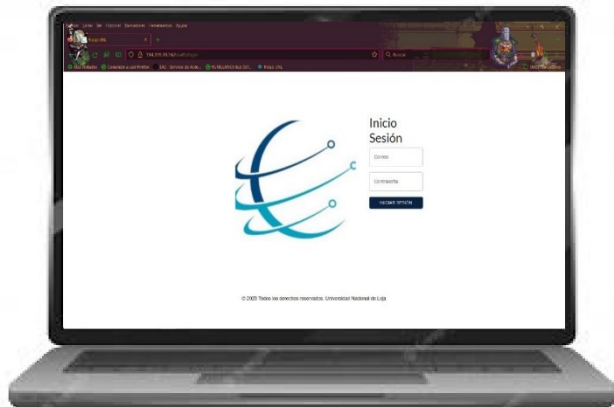
- Mostrar información sobre el contenido de humedad del suelo mediante las lecturas de los sensores para la toma de decisiones en la aplicación del riego adecuado.
- Mejorar la eficiencia del riego a través del control preciso de la cantidad de agua que se debe aplicar mediante la apertura y cierre de riego automatizado.
- Facilitar a los usuarios el monitoreo y control remoto de los sistemas de riego a través de smartphone o computadora.



## Especificaciones:

### Ingreso a la página web “Login”

Para ingresar a la página Riego UNL se introduce el siguiente link: <http://134.209.70.162/auth/login>, en lo cual muestra el siguiente interfaz de ingreso a la web.



Para el ingreso de login de usuario se solicita un correo y una contraseña el mismo que será facultado por el administrador de la página web al momento de solicitar o adquirir el producto.

Si las credenciales son correctas, aparece la ventana de bienvenida a la Riego UNL para lo cual aceptamos en “OK”



## Especificaciones.

En la interfaz de “Home” se ha subdivido en diferentes sectores de navegación, en los que se visualizan a continuación:

(1) Área de trabajo donde se encuentran los parámetros: tipo del suelo, sensores en funcionamiento, controlador de caudal y, encendido y apagado del sistema de riego.

(2) El cierre de sesión, se ubica en la parte superior a la derecha, tiene la función de cerrar el aplicativo.

(3) El nombre de la página con su logotipo se localiza en la parte superior izquierda.

(4) Es el menú de las ventanas para configurar la página.

(5) Son las ventanas para configurar la página y pueda monitorear y controlar las funciones que tiene este sitio web.

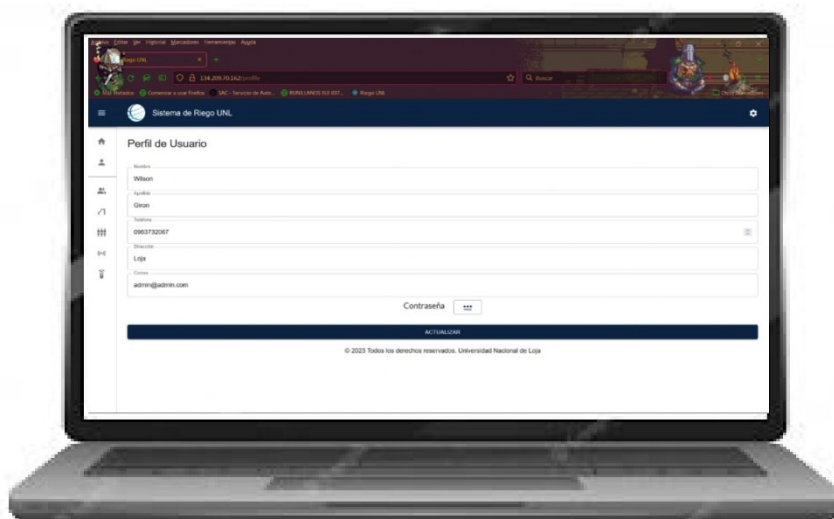
The screenshot shows the 'Sistema de Riego UNL' web interface. At the top, there is a navigation bar with the page title 'Sistema de Riego UNL' and a user profile icon. Below this is the 'Centro de Control' section, which displays six soil type cards with their respective parameters (CC, PMP, and soil composition). The 'Datos Sensores' section contains five gauge charts showing sensor data. The 'Control de Riego' section at the bottom features a 'Riego 1' status card and a gauge. Numbered callouts (1-5) highlight specific UI elements: 1 points to a sensor gauge, 2 to the user profile/logout area, 3 to the page title/logo, 4 to the navigation menu, and 5 to the main content area.



## Operación de la página.

### Interfaz del “Perfil”

El Perfil de Usuario puede actualizar los datos como administrador principal de la página, también puede añadir y actualizar información de tipos de suelo, adicionar sensores, y dar acceso a nuevos usuario o personas a la página con la facultad de editar campos y funciones.

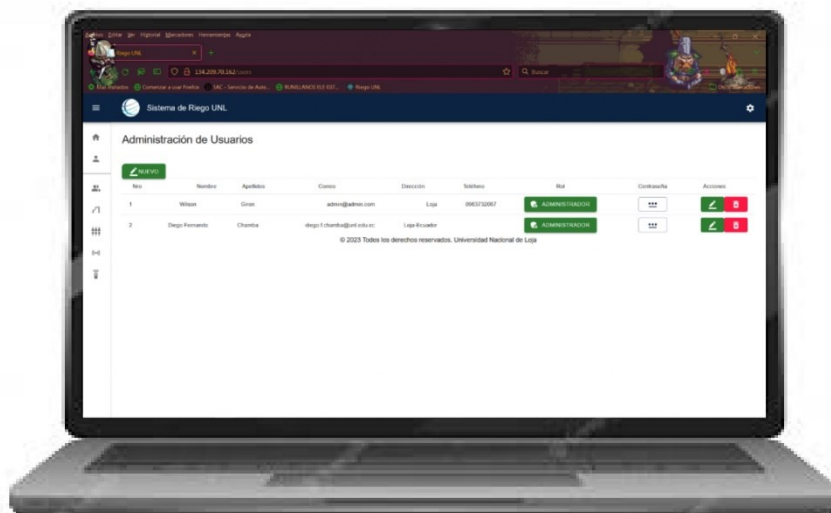




## Operación de la página.

### Interfaz del “Usuario”

En la ventana Administración de Usuarios se la emplea para aumentar el número de usuarios, dando el rol “usuario”. Este podrá visualizar los datos en tiempo real hasta tener un control de riego, pero no podrá editar ningún campo sin el permiso del “administrador”. Mientras tanto el rol “administrador secundario” tiene la función parecida al administrador principal, lo que quiere decir que tiene acceso a editar información de la página, a eliminar usuario o lo que se requiera retirar de la lista.

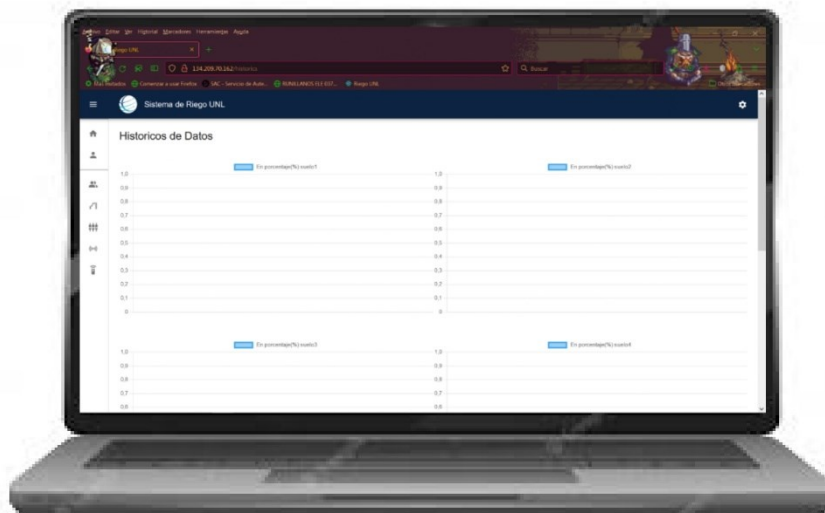




## Operación de la página.

### Interfaz de “Histórico”

En la ventana “Histórico” tiene la función de guardar las lecturas de los diferentes sensores. Muestra las lecturas acumuladas desde el funcionamiento de los sensores.





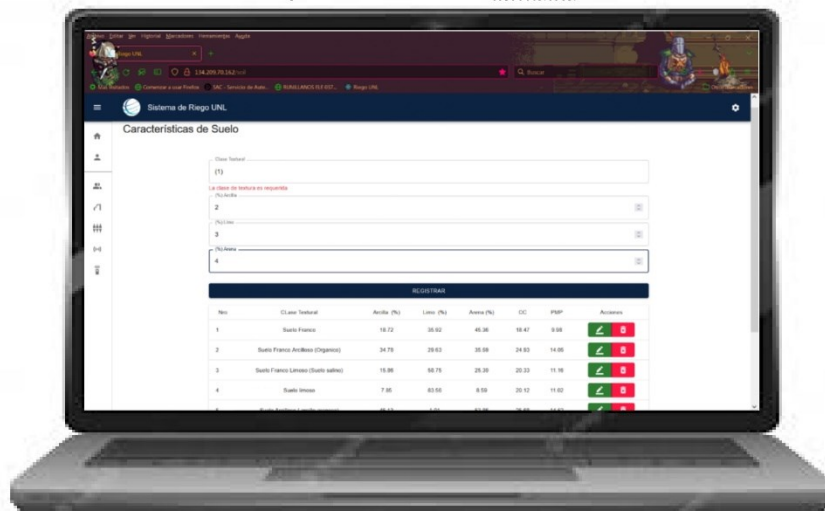
## Operación de la página.

### Interfaz de “Suelo”

Es la ventana donde se puede añadir la información de las características físicas del suelo en los que se han instalado los sensores. Se muestra la clase textural de acuerdo al porcentaje de Arcilla, Limo y Arena. En base a la clase textural se podrá estimar las funciones de manejo de humedad del suelo como capacidad de campo y p

Para configurar las clases de suelos se procede de la siguiente manera:

- (1) Se debe llenar la clase textural suelo.
- (2) Se adiciona el porcentaje de Arcilla.
- (3) Se añade el porcentaje de Limo.
- (4) Se complementa con el porcentaje de Arena.
- (5) Es el botón para poner registrar la información anterior.

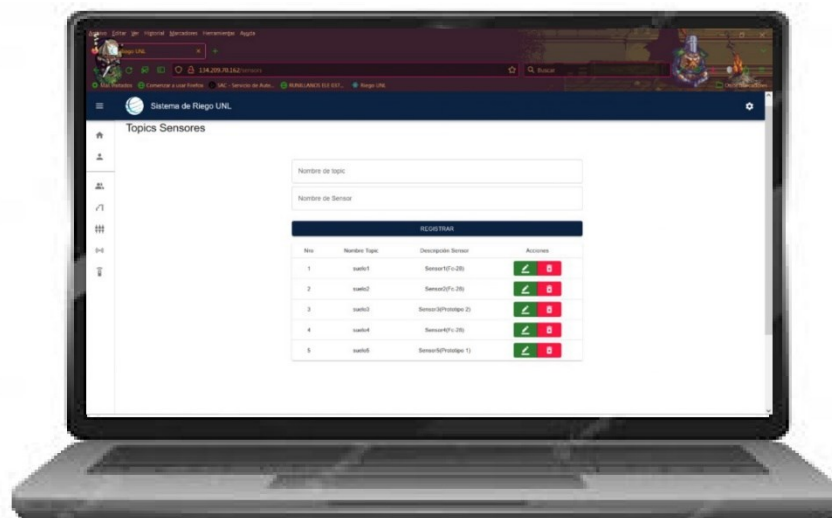




## Operación de la página.

### Interfaz “Topics Sensor”

En la ventana Topics de sensores se añaden los sensores de humedad del suelo de acuerdo al código configurado para su lectura.



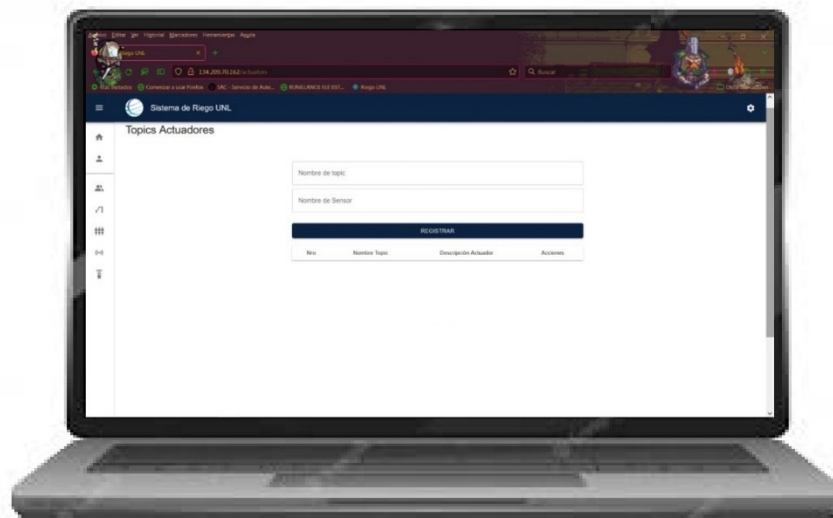




## Operación de la página.

### Interfaz "Topics de Actuadores"

En la ventana Topics de actuadores se añaden los relee de acuerdo al código configurado para su lectura para controlar las electroválvulas y/o bombas que se esté ocupado en el sistema de riego.



## Anexos 18. Certificado del inglés del Abstract



**Juan Pablo Ordóñez Salazar**  
**CELTA-Certified English Teacher,**  
**traductor e intérprete.**

Certificación de traducción al idioma inglés

Juan Pablo Ordóñez Salazar.  
CELTA-certified English Teacher, traductor e intérprete

CERTIFICA:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés, del resumen de tesis titulado: "Evaluación de sensores de humedad de suelo de bajo costo con fines de aplicación al riego eficiente", de autoría del estudiante Wilson Josue Giron Erazo con número de cédula 0750180846, egresado de la Carrera Ingeniería Agrícola de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico en honor a la verdad, y autorizo al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Loja, 5 de julio del 2023

110360109  
O JUAN  
PABLO  
ORDÓÑEZ  
SALAZAR

Firmado  
digitalmente por  
110360109-0  
JUAN PABLO  
ORDÓÑEZ  
SALAZAR  
Fecha: 2023.07.05  
12:26:21 -0500

Juan Pablo Ordóñez Salazar

DNI: 110360109-0

Código de perito: 12298374

CELTA – CERTIFIED ENGLISH TEACHER, TRADUCTOR E INTÉRPRETE