



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN
MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

JOEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ ROBERTO HERNÁNDEZ BARAJAS

EN CODIRECCIÓN DE:

MIPA. SERGIO RAMOS HERRERA

VILLAHERMOSA, TABASCO

MARZO, 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 24 del mes de febrero del año 2025, el que suscribe **JOEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ** alumno del Programa de **INGENIERÍA AMBIENTAL** con número de matrícula **192G24152**, adscrito a la **DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del **Título de Licenciatura** y titulada **“DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL”**

dirigida por el **DR. JOSÉ ROBERTO HERNÁNDEZ BARAJAS** y codirección por **M.I.P.A. SERGIO RAMOS HERRERA**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la **LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR** (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 24 de febrero 2025.



Joel Hernández Hernández



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 24 de Febrero de 2025

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JOEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2025
AÑO DE LA **Mujer**
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

FEBRERO 24 DE 2025

**C. JOEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas y MIPA, Sergio Ramos Herrera, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Idefonso Jesús Díaz Ramírez, MISA. Elizabeth Magaña Villegas, Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dra. Erika Espinosa Escalante, MIA. Jesús Manuel Carrera Velueta.

**A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



**2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena**

21 de febrero de 2025

**C. Joel Hernández Hernández
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su documento de Tesis **"DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL"**.

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y fuentes pequeñas (o palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	2 %
	18972 palabras, 10 coincidencias y 8 fuentes

Finalmente, se le solicita al **C. Joel Hernández Hernández**, integrar en la versión final del trabajo recepcional (Tesis), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p. Dr. José Roberto Hernández Barajas. Director de tesis.
C.c.p. MIPA. Sergio Ramos Herrera. Codirector de tesis.
C.c.p. Archivo

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **“DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para la difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 24 de febrero de 2025.

AUTORIZO



Joel Hernández Hernández

Agradecimientos

A Dios, por darme la inteligencia, ser mi luz en los momentos más difíciles y por todo lo que me ha brindado.

A mi madre, porque a pesar de las circunstancias difíciles siempre ha estado para apoyarme, motivarme y por ser un ejemplo para seguir adelante. A mi padre, por ser un ejemplo para mí y por todo su apoyo.

A mis abuelos, por apoyarme incondicionalmente y siempre creer en mí ¡Gracias!

A mis hermanos: Misael y Vanessa, por formar parte de mi vida, inspirarme y darme fuerzas para seguir adelante.

A mis amigos: Arquímedes, Angela, Nadia, Miguel, Pamela, Yolanda y Ricardo... Por formar parte de mi vida y ser mis compañeros en esta etapa de mi vida, que sin ustedes todo el proceso hubiera sido muy difícil... Gracias por darme todo su apoyo y muy buenos momentos.

Al Dr. Barajas, por creer en mí, brindarme parte de su tiempo para compartir sus conocimientos y darme sus consejos... ¡Muchas gracias!

Al Dr. Ildefonso y la Dra. Erika por facilitarme las instalaciones del Laboratorio de Bioprocesos y Tecnología Ambiental.

A todos los que me brindaron su apoyo en mi formación académica.



Índice general

Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	IV
Resumen	V
Abstract	VI
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	6
Software y Hardware de Código Abierto.....	6
Software Privado.....	6
Plataformas Comerciales más Empleadas.....	7
Arduino.....	7
Raspberry Pi.....	8
Beagle.....	9
NodeMCU.....	9
ESP32.....	10
Matrices Sólidas de Interés Ambiental.....	10
Suelo.....	10
Sustrato.....	11
Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente.....	11
Tipos de Humedad.....	12
Medición de la Humedad en el Suelo.....	12
Métodos directos.....	14
Métodos indirectos.....	14
Capacitancia.....	14
Constante Dieléctrica.....	15
3. Antecedentes	16
Calibración de Sensores Capacitivos de Bajo Costo.....	16
Control de Sistemas de Riego.....	22
4. Justificación, Hipótesis y Objetivos	25
Justificación.....	25
Hipótesis.....	26



Objetivos	26
Objetivo general	26
Objetivos particulares	26
5. Materiales y Métodos.....	28
Diseño del Dispositivo Electrónico.....	28
Mediciones en Agua y Aire.....	30
Selección de Matrices Sólidas.....	31
Método de Porómetros	33
Determinación de Mezclas	35
Mediciones en Matrices Sólidas.....	36
Modelos Empíricos y Análisis Estadístico.....	37
Modelos de lineales	38
Modelo polinomial	38
Modelo sigmoideal.....	39
6. Resultados y Discusión	41
Dispositivo Electrónico Ensamblado	41
Pruebas Preliminares	42
Respuesta del dispositivo electrónico.....	42
Pruebas de medición en agua.....	43
Pruebas de medición en aire	46
Determinación de Humedad en Matrices Sólidas	47
Caracterización de las matrices sólidas.	47
Calibración del dispositivo	50
Validación de Modelos Propuestos	59
Modelo Integrador Propuesto.....	62
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	65
Conclusiones	65
Recomendaciones.....	66
8. Referencias.....	67
Anexo A. Código para el Funcionamiento del Dispositivo Electrónico.....	74
Anexo B. Código de Calibración con Modelo Integrador	76



Índice de Figuras

Figura 1. Circuito del dispositivo electrónico con las conexiones de los componentes a los pines correspondientes de la tarjeta Arduino 2560.....	29
Figura 2. Esquema de ensamblaje del dispositivo controlado por la tarjeta Arduino 2560.....	30
Figura 3. Sitio de recolección del suelo limoso de un predio de Vainilla en Nacajuca, Tabasco.	32
Figura 4. Sitio de recolección del suelo franco arenoso en Acachapan y Colmena, Centro, Tabasco.	32
Figura 5. Sitio de recolección del suelo arcilloso en un predio de Villahermosa-Macuspana, Tabasco.	33
Figura 6. Procedimiento para la determinación experimental de la humedad del suelo. En la figura, a) peso de las muestras; b) humectación del suelo; c) lecturas con el sensor capacitivo; d) determinación de la humedad con la termobalanza.	37
Figura 7. Dispositivo electrónico ensamblado.....	41
Figura 8. Pantalla de la plataforma de desarrollo Arduino IDE: a) muestra el código de programación y b) muestra la pantalla de lecturas del dispositivo electrónico.	42
Figura 9. Tiempo de estabilización del sensor en las lecturas de un entorno seco a húmedo (n=6).	43
Figura 10. Relación entre las lecturas del dispositivo y el modelo de ajuste por calidad del agua.	45
Figura 11. Curvas de calibración del dispositivo electrónico para las diferentes matrices sólidas: a) suelo limoso; b) suelo franco arenoso; c) suelo arcilloso y d) sustrato, con las ecuaciones lineales, polinomiales de segundo orden y modelo de Gompertz.....	52
Figura 12. Curvas de calibración del dispositivo considerando la Influencia por calidad de agua. Se consideró la influencia de los parámetros de calidad del agua para la calibración de las matrices sólidas: a) suelo limoso; b) suelo franco arenoso; c) suelo arcilloso y d) sustrato.	58
Figura 13. Relación de la humedad gravimétrica con la humedad calculada para las matrices sólidas. Se comparan los valores de primera instancia con los calculados considerando la influencia de calidad de agua (ICA).	61
Figura 14. Relación de la humedad gravimétrica con los valores calculados por el modelo integrador. El color azul representa el tipo de agua 1 y el color rojo el tipo de agua 2.	63



Índice de Tablas

Tabla 1. Caracterización de los diferentes tipos de agua usados para la calibración del dispositivo.....	44
Tabla 2. Valores de los parámetros del modelo de regresión lineal de calidad de agua.....	46
Tabla 3. Caracterización de las propiedades físicas de las matrices sólidas.....	48
Tabla 4. Humedad gravimétrica inicial de las matrices sólidas	49
Tabla 5. Mezclas propuestas con su relación matriz sólida - agua.....	50
Tabla 6. Ecuaciones obtenidas para cada matriz sólida con sus métricas de bondad de ajuste.	53
Tabla 7. Ecuaciones y métricas de la calibración para las matrices sólidas considerando la influencia de los parámetros de calidad de agua	59
Tabla 8. Diferencia estadística de los valores generados por las curvas de calibración y las curvas considerado el ajuste por influencia de calidad de agua con el modelo de Gompertz	60
Tabla 9. Valores de los parámetros del modelo propuesto.....	62



Dispositivo Electrónico para el Registro de Humedad en Matrices Sólidas de Interés Ambiental

Resumen

La humedad del suelo es un parámetro esencial para el estudio de los suelos y la agricultura. Se han desarrollado diversos métodos para determinarla, aunque estos suelen ser costosos y laboriosos. En este sentido, el avance de la electrónica ha permitido el desarrollo de la aplicación de sensores de bajo costo con potencial de aplicación para diferentes áreas de investigación. En este trabajo se propuso un dispositivo electrónico controlado mediante la tarjeta Arduino Mega 2560 y un sensor capacitivo (*Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0*) para determinar la humedad del suelo. El objetivo principal fue calibrar el dispositivo en matrices sólidas de interés ambiental, donde se usaron diferentes clases texturales: suelo limoso, suelo franco arenoso, suelo arcilloso y sustrato a base de lirio acuático con agrolita. Así también, se buscó determinar la influencia de los parámetros de calidad del agua (pH, Temperatura, Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales) sobre el sensor.

La calibración se realizó a través de modelos lineales, modelos polinomiales de segundo orden y el modelo de Gompertz. Donde el modelo de Gompertz se empleó para generar un modelo integrador que permitiera calcular las curvas de calibración de cada matriz sólida a través de parámetros físicos fácilmente medibles de las matrices sólidas. El dispositivo mostró resultados aceptables en la calibración con los tres modelos con R^2 superiores a 0.95. En este estudio, la influencia de la calidad del agua en la estimación de la humedad fue moderada mientras que los parámetros de la matriz sólida fueron notablemente significativos.



Abstract

Soil moisture is an essential parameter for the study of soils and agriculture. Various methods have been developed to determine it, although they are often costly and laborious. In this regard, advances in electronics have enabled the development of low-cost sensors with potential applications in different research areas. In this study, an electronic device controlled by the Arduino Mega 2560 board and a capacitive sensor (Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0) was proposed to determine the soil moisture. The main objective was to calibrate the device in solid matrices of environmental interest, using different textural classes: silty soil, sandy loam soil, clay soil, and a substrate based on water hyacinth with perlite. Additionally, the influence of water quality parameters (pH, temperature, electrical conductivity, and total dissolved solids) on the sensor was assessed.

Calibration was performed through linear models, second-order polynomial models, and the Gompertz model. The Gompertz model was used to generate an integrative model that allowed the calculation of calibration curves for each solid matrix through easily measurable physical parameters of the solid matrices. The device showed acceptable results in calibration with the three models with R^2 above than 0.95. In this study, the influence of water quality in soil moisture estimation was moderate whereas the solid matrix parameters were noticeably significant.

Palabras clave: Sensor capacitivo, Arduino, Humedad de suelo, software libre.



1. Introducción

Las matrices sólidas son aquellas que pueden brindar soporte para que las raíces de las plantas se puedan desarrollar, sus principales componentes son los minerales y la materia orgánica. Sin embargo, existe una complejidad en su organización la cual se denomina agregados. Los agregados forman espacios porosos que tienen un papel fundamental en la estructura de las matrices y de ellos dependen algunas de las características fundamentales como la retención del agua y los procesos biológicos (Minervini *et al.*, 2018).

El suelo es uno de los recursos del cual la humanidad cada vez depende más para conseguir los alimentos a través de la agricultura, lo cual ha generado una mayor demanda de sitios, recursos energéticos, humanos e hídricos. Así mismo, causa la búsqueda de nuevas alternativas diferentes al suelo, donde se pueda producir alimentos (Weil & Brady, 2019). Tal es el caso de los sustratos elaborados a partir de una mezcla ligera de enmiendas orgánicas estabilizadas y agregados livianos estabilizados, principalmente se utilizan en áreas urbanizadas como medios de soporte para el crecimiento de plantas pequeñas como hortalizas, en jardinería, en techos y muros verdes (Quesada, 2015; Weiler & Scholz-Barth, 2009). Sin embargo, no existe una mezcla perfecta de sustrato, por lo que para su elaboración se requieren estudios de laboratorio que determinen su funcionalidad a través del análisis de sus características físicas y la experimentación con diferentes condiciones ambientales.

Las matrices sólidas proporcionan a las plantas nutrientes, agua y oxígeno, para su desarrollo, estas condiciones dependen de su composición, propiedades físicas y químicas. En el suelo, las propiedades físicas secundarias (textura, estructura, porosidad, densidad aparente,



tamaños de poros, entre otros) influyen indirectamente en el crecimiento de las plantas determinando las condiciones físicas primarias: agua, aire, impedancia mecánica y temperatura (Sharma & Kumar, 2023). A partir de ello, se considera la medición del contenido de humedad como de vital importancia para las plantas, así como para el diseño y la implementación de proyectos sostenibles (Weiler & Scholz-Barth, 2009).

De acuerdo con Weil & Brady (2019) y Osman (2013), el agua se distribuye por los poros de las matrices, transportando nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. Esta se almacena en los poros grandes e intermedios y permanece como agua disponible para su aprovechamiento por las raíces de las plantas, y una vez que el agua es consumida, los poros se llenan de aire y solo permanece un pequeño porcentaje de agua en los poros más pequeños. En este sentido, la humedad se puede encontrar como humedad gravitacional, humedad capilar y humedad higroscópica.

Para medir la humedad se han desarrollado diferentes métodos basados en diferentes principios que pueden ser directos o indirectos, los cuales incluyen la implementación de nuevas tecnologías que comienzan a tener relevancia por su nivel de precisión y lecturas en tiempo real de la humedad en suelo, mejorando los tiempos de esperas que demoran las técnicas tradicionales y permitiendo tener una gestión de los recursos hídricos con la implementación de sistemas de riego controlado en la agricultura. Lo anterior ayuda con la problemática hídrica que se presenta en los campos de cultivo, invernaderos e industria agrícola. Los beneficios de nuevas tecnologías se reflejan en un mejor uso y aprovechamiento del agua en el campo. Al respecto, Susha *et al.*, (2014) describieron entre otras, las técnicas utilizadas para determinar la humedad:



- i) Método termogravimétrico, consiste en determinar la humedad del suelo a través de la relación entre el peso del suelo y del agua perdida cuando es sometida a una temperatura de 105°C, generalmente es el más utilizado para determinar la humedad del suelo.
- ii) La técnica del carburo de calcio (C_2Ca), donde se utiliza un reactivo de C_2Ca en una muestra de suelo la cual reacciona con el agua presente, generando gas acetileno (proporcional a la humedad del suelo) el cual es medido en una cámara sellada.
- iii) Tensiómetros, los cuales se basan en la medición del potencial mátrico del suelo a través de un cambio de presión medido con un vacuómetro.
- iv) Resistencia eléctrica, basadas en la resistencia eléctrica presente en el suelo.
- v) Técnicas dieléctricas como la capacitancia, reflectometría en el dominio del tiempo (TDR, por sus siglas en inglés, *Time Domain Reflectometry*) y reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR por sus siglas en inglés, *Frequency Domain Reflectometry*).

Sin embargo, a pesar de que las técnicas con nuevas tecnologías y los métodos tradicionales muestran muy buenos resultados, ambos presentan desventajas como tiempos analíticos muy prolongados o costos elevados. A pesar de ello, la capacitancia, una técnica dieléctrica, ha tenido relevancia debido a que ha mostrado tiempos de respuesta rápida; su elaboración tiene bajos costos



de inversión, lo que ha generado una producción de diferentes sensores asequibles basados en capacitancia para medir la humedad en el suelo, los cuales son fáciles de emplear.

Debido a lo anterior, ha surgido un área de investigación donde se aprovecha el avance de la electrónica para la aplicación y desarrollo de dispositivos electrónicos en diversas áreas como la agrícola y ambiental. Estos dispositivos son armados con microcontroladores de fácil adquisición como los desarrollados por Arduino y las tarjetas ESP32, nodeMCU o Raspberry que funcionan a través de hardware y software libres. Lo anterior permite al desarrollador un mayor control sobre el proceso de desarrollo en todo momento, disminuir costos de inversión, realizar calibraciones específicas y compartir los avances y hallazgos de su investigación, para que la comunidad interesada pueda acceder a los códigos de su trabajo para hacer modificaciones y mejorarlo (Lugo Espinosa *et al.*, 2014). En este proyecto de investigación se tuvo como objetivo el desarrollo de un dispositivo electrónico para la medición del contenido de humedad en matrices sólidas de diversos orígenes y composiciones. Para el cual se utilizó una tarjeta Arduino como microcontrolador de un sensor capacitivo, el cual para su calibración se consideró la porosidad, densidad aparente y la influencia del agua. Además, se compararon diferentes curvas de calibración por regresión lineal, regresión polinomial y una ecuación sigmoideal, para determinar un mejor ajuste de los datos.

En este documento se presenta en el marco teórico los conceptos generales sobre el tema, así como cuales son las plataformas de uso libre más utilizadas. Cuenta con un apartado de antecedentes de la investigación, donde se describen trabajos que han tenido relevancia sobre la implementación de sensores de bajo costo, las diferentes matrices sólidas empleadas para su



calibración, afectaciones o influencias de las propiedades físicas y químicas, y su empleo para el control de sistemas de riego. También se incluye la justificación del trabajo con la hipótesis planteada y el objetivo general con sus objetivos específicos. En el apartado de materiales y métodos se presenta el diseño del dispositivo, mediciones en agua y aire, selección de matrices sólidas, determinación de mezclas, mediciones en matrices sólidas y modelos empíricos con análisis estadísticos. En el apartado de resultados y discusión se muestra el tiempo de respuesta del dispositivo, las propiedades físicas de las matrices sólidas, la calibración del dispositivo, un modelo generado a partir de las propiedades físicas y la validación del dispositivo. En el último apartado se abordan las conclusiones a las que se llegaron con la investigación. Finalmente, se presenta la bibliografía consultada y los anexos donde se encuentran los códigos empleados para la calibración del dispositivo.



2. Marco Teórico

Software y Hardware de Código Abierto

El *software* libre y de código abierto (*open source software*) es un término que se utiliza para aquellos programas de cómputo que se encuentran disponibles desde su código fuente, donde los usuarios tienen permitido realizar modificaciones, estudiarlos, compartirlos y utilizarlos sin ningún tipo de restricción. El concepto surgió durante el movimiento del *software* libre realizado por un grupo de hackers, como respuesta a las restricciones y prohibiciones del *software* privado (Pearce, 2013). Del mismo modo, el *hardware* de uso libre (*open source hardware*) se basa en la utilización sin restricciones de los componentes donde su fabricación no adquiere un registro de propiedad intelectual para una industria, dueño o empresa. Lo anterior permite a los usuarios compartir sus hallazgos con otros y generando el fortalecimiento del conocimiento de forma colaborativa (López Aldea, 2016).

Software Privado

A diferencia del *software* libre, el *software* privado está bajo la titularidad de quien lo desarrolló, siendo este una persona física o jurídica (industria, compañía, empresa, universidad, etc.) el cual tiene la capacidad de definir lo que se puede realizar, limitando las libertades de los usuarios. La *Free Software Foundation* (FSF, Fundación de Software Libre), define al *software* privado como aquel que no es libre, por lo que se requiere de una autorización del propietario para utilizarlo modificarlo o compartirlo. Tiene fines lucrativos, por lo que se encuentra protegido por el sistema *copyright* el cual le concede los derechos al autor o creador (Navarrete *et al.*, 2011).



Plataformas Comerciales más Empleadas

A continuación, se describen algunas de las plataformas basadas en *hardware* y *software* libre más relevantes, utilizadas para el desarrollo de dispositivos electrónicos.

Arduino

Arduino fue creado en el 2005 por Massimo Banzi, presentado como una alternativa a la falta de accesibilidad por costos elevados de microcontroladores. El objetivo era proporcionar una plataforma asequible y accesible para aquellas personas interesadas en la electrónica y la programación. Inicialmente, su primer prototipo contaba con un microcontrolador conectado a una placa con circuitos eléctricos con resistencia de voltaje. En la actualidad, Arduino es la plataforma líder en dispositivos electrónicos basados en código libre con una variedad de tarjetas disponibles de bajo costo, perfectas para el aprendizaje y desarrollo de múltiples proyectos (Banzi & Shiloh, 2021).

De acuerdo con López Aldea (2016), la tarjeta Arduino Uno es una de las primeras y más utilizadas por los usuarios, cuenta con seis entradas analógicas digitales (ADC) desde el pin A0 al A5, los cuales son capaces de convertir lecturas físicas proporcionadas por los diferentes sensores a través de un cambio de tensión de 5 V o 3.3 V. Los pines analógicos utilizan una resolución de 10 bits, lo que proporciona un total de 1024 posibles valores distintos. De manera general se utiliza una tensión de 5 V por lo que cada incremento de medida representa 0.004883 V, lo que se aproxima a 5mV. Las tarjetas Arduino, en cualquiera de sus modelos (Arduino Uno, MEGA, Nano), cuentan con un microcontrolador Atmega de la familia AVR, que son una serie de microcontroladores RISC del fabricante Atmel. El microcontrolador se encarga de procesar la



información recibida por un sensor (*read*), la procesa y envía una señal de salida (*write*) según la programación.

La programación de una tarjeta Arduino se realiza a través de *software* Arduino IDE, mediante el cual se puede crear programas que son enviados directamente al microcontrolador y dar las instrucciones establecidas (*sketch*). Su lenguaje de programación está basado en C, C++ y *assembler*, por lo que es fácil de utilizar y puede ser muy complejo según los conocimientos del usuario (López Aldea 2016; Misra, 2021).

Raspberry Pi

El Raspberry Pi fue creado en el 2006 en la Universidad de Cambridge con el motivo de acercar a los estudiantes de manera fácil y económica a la programación de computadoras. La placa tiene una dimensión aproximada de 9 cm × 6 cm, la cual tiene integrada una variedad de componentes que permite ser utilizada como una computadora. Utiliza a Linux como sistema operativo debido a que es más eficiente en comparación de otros sistemas como Windows. Cuentan con procesador System on a Chip (SoC) llamado BCM2835 que contiene un procesador ARM1176JZ-F que funciona a 700 MHz, 256 MB de RAM y un GPU VideoCore IV (Schmidt, 2012). Su programación depende de su finalidad, por lo que se realiza según al sistema integrado propuesto y el almacenamiento de información se puede recolectar a través de una tarjeta SD (*Secure Digital*). Además, dispone de un puerto Ethernet para la conexión a Internet o a una red local. Cuenta con dos puertos USB (*Universal Serial Bus*); un estándar industrial que define cables, conectores y protocolos utilizados en un bus para conectar, comunicar y suministrar energía eléctrica entre computadoras, periféricos y dispositivos electrónicos (Dembowski, 2013).



Beagle

Beagle es una tarjeta electrónica de bajo costo desarrollada por *Texas Instruments* para el estudio de software y hardware libre. Está integrada por un procesador SoC, un Open Multimedia Application Platform 3 (OMAP3), el cual contiene un núcleo ARM (Advanced RISC Machine) de 1 GHz y un Procesador de Señal Digital (DSP). Debido a su diseño de sistema integrado, puede describirse como una pequeña computadora con el potencial de expandirse a un equipo de escritorio, es compatible con el sistema operativo Linux y para su programación se pueden utilizar diversos lenguajes de programación como: C++, Perl, Python, Ruby, PHP, JavaScript, Java o Node.js (Qin & Dai, 2013).

NodeMCU

La combinación del lenguaje de programación Lua integrado al microcontrolador ESP8266 dio el origen a NodeMCU. El microcontrolador está habilitado para Wi-Fi, lo que permite obtener información de los componentes conectados a través del protocolo Wi-Fi. Además, la interfaz del entorno de desarrollo es amigable y ofrece resultados rápidos para la creación de aplicaciones basadas en el internet de las cosas (IoT,) con soporte para una variedad de sensores o componentes. El NodeMCU cuenta con un sistema de archivos basado en *flash* llamado SPIFFS (Sistema de Archivos Flash de Interfaz Periférica Serial) en el módulo. Se puede desarrollar en plataformas como Arduino IDE, Espruino, Mongoose OS, Espressif SDK, entre otras (de Oliveira, 2021; Parihar, 2019).



ESP32

El ESP32 es un sistema de doble núcleo con dos CPUs Xtensa LX6, permite la conectividad Wi-Fi y bluetooth alcanzado una velocidad de hasta 4Mbps de operatividad. Normalmente se presenta en forma de módulo y permite hasta la conectividad de 20 componentes externos. El microprocesador integra los núcleos PRO_CPU para protocolo y APP_CPU para aplicación. También cuenta con memorias integradas con 520 kB SRAM, 448 kB ROM y dos memorias RTC (*Real Time Clock*) de 8 KB que combinadas crean un SRAM del RTC igual a 16 kB (Maier *et al.*, 2017). De acuerdo con Bertoleti (2019), una de las grandes ventajas con las que cuenta el ESP32, es que se puede utilizar un sistema operativo en tiempo real con la finalidad del compartimiento de información y la transferibilidad de otros proyectos a través del sistema operativo de tiempo real kernel; FreeRTOS. Su programación puede darse entre varias plataformas basadas en leguajes de C, C++, Java; como Lua, Arduino IDE, JavaScript y MicroPython.

Matrices Sólidas de Interés Ambiental

Suelo

La composición del suelo es una mezcla entre minerales primarios (arena, arcilla y limo), minerales secundarios, materia orgánica, agua, aire y microorganismos. La distribución de los minerales, el tamaño de las partículas y la composición de la materia orgánica influyen sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo (McCarty *et al.*, 2016). El suelo tiene la función de medio de soporte permitiendo el desarrollo de la mayoría de las plantas (plantas terrestres), el cual influye en su crecimiento a través de sus propiedades físicas primarias: contenido de humedad, temperatura, aire y resistencia (Sharma & Kumar, 2023).



Sustrato

El sustrato es un medio de soporte que puede ser de origen natural, sintético, residual, mineral u orgánico. Puede obtenerse a través de la degradación biológica, la síntesis química, de materiales derivados de rocas o minerales sometidos a procesos físicos o químicos para producir fibras y gránulos muy porosos, residuos y subproductos industriales, o de la estabilización de subproductos de diversas actividades de producción y consumo que generan aserrín, viruta de madera, residuos sólidos urbanos, lodos activados, fibra de coco, entre otros. Con estos productos se produce un material sólido diferente del suelo (el sustrato) en mezclas o de manera directa, que proporciona nutrientes, agua y permite el intercambio gaseoso necesario para el desarrollo del sistema radicular de las plantas. Además, debido a su origen, tamaño de partícula y porosidad, los sustratos tienen una alta capacidad de retención de humedad a bajas tensiones (Villegas *et al.*, 2017). Es común su uso en sitios controlados como hortalizas, siembra de flores, plantas ornamentales, techos y muros verdes (Quesada, 2015).

Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente

La capacidad de campo es la cantidad de agua que puede retener el suelo después de la saturación causada por el riego o la lluvia. Una vez que al agua se ha drenado por gravedad se alcanza este equilibrio dejando el agua disponible retenida por el suelo, que puede ser utilizada por las plantas (Weil & Brady, 2019). Por otro lado, el punto de marchitez permanente (PMP) es el límite inferior del agua disponible presente en el suelo, en este punto las hojas de las plantas presentes en el suelo se deshidratan y se marchitan siendo incapaces de recuperar turgencia (Osman, 2013; Weil & Brady, 2019).



Tipos de Humedad

De acuerdo con Osman (2013) y Sánchez (2019) la humedad en el suelo puede encontrarse de tres formas diferentes:

- i) Humedad gravitacional, es la humedad que se presenta cuando existe una saturación de agua en el suelo, esta es almacenada temporalmente en los macroporos y puede estar disponible físicamente. Sin embargo, las plantas no pueden disponer de ellas o pueden hacerlo en menor medida en lo que la fuerza de gravedad genera el drenado del exceso de agua en el suelo. Generalmente se encuentra una tensión en el rango de 0 a 30 kPa.
- ii) Humedad capilar: se encuentra en los microporos en forma de películas delgadas de agua alrededor de las partículas del suelo. Se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez de las plantas, por lo que está disponible para las raíces de las plantas.
- iii) Humedad higroscópica: es el resultado final después de que un suelo haya recibido agua, también es conocida como agua residual, debido a que es adherida fuertemente a partículas coloidales presentes en el suelo. Normalmente se encuentra a tensiones menores a -1,500 kPa, por lo que es muy difícil de remover.

Medición de la Humedad en el Suelo

La humedad puede determinarse en unidades de masa o volumen. Cuando se trabaja con la relación entre la masa de agua (g o kg) por unidad de masa de suelo seco (g o kg) se conoce como contenido gravimétrico de agua (GWC, por sus siglas en inglés *gravimetric water content*)



y generalmente se expresa en porcentaje de masa (Shukla, 2023), esto se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \quad (1)$$

Donde θ_m es el contenido gravimétrico del agua, M_w representa la masa del agua y M_s la masa del suelo (Osman, 2013). De manera similar, se emplea el método utilizando la relación entre el volumen del agua (cm^3 o m^3) por el volumen total del suelo (cm^3 o m^3), conocido como contenido volumétrico de agua en el suelo expresado en porcentaje volumétrico (VWC, por sus siglas en inglés *volumetric water content*) (Shukla, 2023). Para ello, se realiza una modificación a la Ecuación 1, resultando como:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_T} \quad (2)$$

Donde θ_v es el contenido volumétrico de agua en el suelo, V_w representa al volumen del agua y V_T representa la suma del volumen de suelo, agua y aire (Osman, 2013). Ambas formas de determinar la humedad en el suelo se relacionan y se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\theta_v = \theta_m \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (3)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente del suelo y ρ_w es la densidad del agua (Osman, 2013).



Existen muchas formas de medir la humedad en el suelo las cuales implican técnicas que pueden ser simples pero laboriosas, hasta técnicas sofisticadas que se apoyan en avances tecnológicos y que pueden ser muy costosas; estos métodos pueden ser directos e indirectos.

Métodos directos

Estos métodos se consideran destructivos o invasivos debido a su procedimiento para determinar la humedad del suelo. Sin embargo, son los métodos más utilizados debido a su baja complejidad de elaboración; pertenecen a este los métodos gravimétricos, termogravimétricos y de tacto (Shukla, 2023).

Métodos indirectos

La determinación de la humedad del suelo a través de métodos indirectos abarca una serie de diferentes técnicas que emplean las propiedades eléctricas del suelo: *i*) la constante dieléctrica, *ii*) la impedancia, *iii*) la capacitancia y *iv*) la resistividad del suelo. Los métodos indirectos utilizados incluyen la técnica de radiación, técnica de dispersión de neutrones, métodos dieléctricos, métodos eléctricos, métodos térmicos, métodos químicos, tensiómetros, métodos acústicos, métodos ópticos y métodos de teledetección (Susha *et al.*, 2014; Shukla, 2023).

Capacitancia

Es la cantidad de carga que un material puede almacenar bajo un potencial eléctrico aplicado, cuando el dispositivo se energiza, almacena cierta cantidad de energía a partir de la generación de un campo eléctrico (Aranda *et al.*, 2022; Hrisko, 2020), en un condensador se puede determinar mediante la siguiente ecuación:



$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} \quad (4)$$

Donde C es la capacitancia, ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío, ϵ es la constante dieléctrica del material, A es el área metálica de la superficie y d es la distancia entre las superficies metálicas (Souza *et al.*, 2020).

Constante Dieléctrica

La constante dieléctrica (ϵ) es una medida adimensional que poseen los materiales la cual responde a un campo eléctrico permitiendo el almacenamiento de energía en un material, por lo que una constante dieléctrica alta permite un mayor almacenamiento de energía mientras que si la constante dieléctrica es baja el almacenamiento será bajo. Se utiliza en sensores capacitivos para determinar la humedad en el suelo debido a que el contenido de agua afecta la ϵ del suelo permitiendo al sensor almacenar energía y transmitirla a través de una señal analógica, debido a que la ϵ del agua es aproximadamente 80 a 25° C en comparación con materiales minerales del suelo que tienen una ϵ entre 2 a 4 y la de aire es aproximadamente uno (Terzic *et al.*, 2012).



3. Antecedentes

En los últimos años se han estudiado a los sensores capacitivos para la determinación de humedad en el suelo, como resultado de la búsqueda de nuevas herramientas que permitan una mejor gestión de los recursos hídricos. Las principales investigaciones se enfocan en la calibración y en su implementación en sistemas de riego. A continuación, se describen algunas de las investigaciones que se han realizado con respecto al tema.

Calibración de Sensores Capacitivos de Bajo Costo

La calibración de los sensores de bajo costo para determinar la humedad en el suelo es indispensable para su implementación en cualquier área y, por ello, se han realizado diversas investigaciones que ayuden a comprender su funcionamiento. Parvin y Degré (2016) evaluaron la influencia del contenido de arcilla y la densidad aparente (DA) de un suelo franco limoso en los sensores capacitivos 10HS y 5TM, para los cuales el fabricante proporciona una ecuación de calibración. Para el estudio se recolectaron muestras de dos sitios a diferentes profundidades (0-5 cm, 25-30 cm y 50-60 cm) que fueron tamizadas a 5 mm y colocadas en recipientes de policarbonato de 1,760 cm³. Posteriormente se les agregó agua entre 75 y 525 mL, con incrementos de 75 mL, se mezclaron y se insertó el sensor para realizar las mediciones. Mientras que, con las salidas registradas por los sensores se realizó una regresión polinomial de segundo grado para cada profundidad, lo que permitió obtener un mejor ajuste en comparación con la calibración proporcionada por el fabricante, debido a que los valores del 10HS tendieron a sobrestimar el contenido de humedad y subestimar para el sensor 5TM. En cuanto a la arcilla y DA , los valores de salida aumentaron con el aumento del contenido de ambas, aunque el efecto no fue muy



significativo. Sin embargo, se considera que el alto contenido de arcilla y *DA* elevada puede causar imprecisiones al medir la humedad del suelo con sensores capacitivos. Finalmente, se recomienda el uso de calibraciones personalizadas en paralelo con las calibraciones del fabricante para obtener mediciones precisas en diferentes tipos de suelo y profundidades.

Por otra parte, Fares *et al.* (2016) trabajaron con el sensor 10HS tipo capacitivo, con el cual determinaron la exactitud y precisión del sensor. Se consideró la influencia de la materia orgánica (MO), debido a que en investigaciones anteriores sólo se ha considerado las propiedades físicas (*DA*, porosidad, compactación y temperatura) y químicas (CE y salinidad) del suelo. Por otro lado, se usó arena de cuarzo por su bajo contenido en MO, con la cual se hicieron ocho mezclas con aserrín en proporción de contenido orgánico de 0% a 18% en volumen con densidades aparentes de 1,670 a 1,450 kg/m³, respectivamente. Las mezclas se colocaron en recipientes de vidrio de 2 L, se utilizó agua desionizada para humectar las mezclas hasta alcanzar el contenido de humedad esperado, excepto a la primera mezcla la cual permaneció seca. Seguidamente se realizaron las mediciones con tres sensores, los cuales fueron insertados durante 5 min en las mezclas. Posteriormente, a los resultados se les realizó una prueba de Tukey HSD que demostró variación en las lecturas de los sensores, siendo significativamente diferentes. Mientras que la MO mostró una correlación negativa con coeficiente de determinación $R^2=0.92$ teniendo un efecto significativo ($p < 0.05$) en la precisión y exactitud. También reportaron que los sensores carecen de sensibilidad a ciertos niveles de humedad, por lo que la precisión disminuyó considerablemente a medida que las muestras se saturaban. Finalmente, se propuso una ecuación de calibración polinomial multivariada incorporando la MO como variable, el cual alcanzó un coeficiente de



determinación $R^2 = 0.98$, que ajustó mejor la humedad en comparación con la ecuación del fabricante, por lo que concluyen que es necesario realizar una calibración para cada sensor considerado la influencia de la MO.

En otro estudio Nagahage *et al.* (2019) determinaron el funcionamiento del sensor SKU: SEN0193 el cual funciona bajo el mismo principio que los trabajos anteriores. Este sensor opera en un rango de 3.3 a 5.5 V por lo que puede funcionar con microcontroladores de bajo consumo. El microcontrolador empleado se enlazó a un módulo Wi-Fi que permitía la utilización de *ThingSpeak*, una plataforma abierta de IoT (Internet de las cosas), para recopilar y analizar la información con *MATLAB Analytics*. Mientras que, la calibración se llevó a cabo a través de la comparación de humedad con un sensor de humedad de referencia; el SM-200 (*Delta-T Devices Ltd.*, Cambridge, Reino Unido) y con la determinación de la humedad a través del método gravimétrico para corroborar la humedad medida por ambos sensores. Para ello, utilizaron un suelo con composición de MO de 24.8 % y contenido mineral de 75.2 %. Además, se empleó una mezcla del suelo con vermiculita en una proporción 1:1; el suelo fue tamizado para obtener un tamaño de partícula menor que 2 mm. Las muestras de suelo se prepararon en recipientes de policarbonato con volumen de 110 cm³ a diferentes humedades, las cuales fueron medidas por cuatro sensores del mismo modelo. Por esta razón, se realizó un análisis de varianza (prueba ANOVA) de sensor a sensor, demostrando que las lecturas eran significativamente diferentes, por lo que se propuso una calibración para cada sensor. Finalmente, se utilizó una función polinomial para el sensor SKU: SEN0193 el cual fue validado con los valores obtenidos por el sensor SM-200 (donde se calibró específicamente al suelo) teniendo un rendimiento aceptable para el suelo y no aceptable



para la mezcla realizada. De manera similar Aranda *et al.* (2022) propusieron el análisis de los datos con una regresión polinomial para dos sensores capacitivos (I2C de Catnip y el SoilWatch 10), determinando la influencia de la temperatura del suelo sobre los sensores. Para ello, utilizaron un suelo arenoso que fue tamizado con un tamiz de 2 mm y realizaron diversas muestras con volúmenes conocidos a las cuales se les fue agregando agua. Mientras que, para el control de la temperatura se utilizó un recipiente de PVC con volumen de 1.4 L donde se colocaron dos sensores SoilWatch y Catnip, posteriormente el recipiente se cerró herméticamente colocándose bajo la sombra en el exterior para que existieran cambios de temperatura en el suelo. Se encontró una correlación lineal positiva para ambos sensores entre sus mediciones y la temperatura. Por otro lado, la calibración con el modelo polinomial de segundo grado obtuvo mejores resultados que los proporcionados por el fabricante, alcanzando una $R^2 = 0.995$ para SoilWatch y $R^2 = 0.991$ para Catnip, además de mejores resultados en las métricas de raíz cuadrada del error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMSE).

Souza *et al.* (2020) usaron el sensor SKU: SEN0193 con una tarjeta Raspberry Pi B+ como controlador de un sistema para medir la humedad del suelo, la cual trabajó a una resolución de 16 bits permitiendo obtener valores entre 0 y 32,767. Se empleó el sistema operativo Raspbian 4.19.66 v7 y se utilizó Python para programar el código de medición. Por otra parte, su calibración se realizó en un suelo con textura limo-arcillosa con la cual se obtuvo una ecuación lineal con R^2 de 0.90. Sin embargo, los experimentos en campo permitieron identificar alteraciones en las lecturas por la composición del suelo. A pesar de ello, el sensor mostró un buen rendimiento para determinar la humedad con un error del 2% en comparación con el peso del suelo real y fue capaz



de determinar los cambios de humedad ocasionados por la lluvia, por lo que se considera adecuado para su implementación en actividades agrícolas. Así también, Placidi *et al.* (2020) emplearon el mismo modelo del sensor en 950 g de arena de sílice colocados en recipientes graduados de 1 L, con la cual se prepararon mezclas que iban de 2.5% al 20% de humedad gravimétrica con incrementos del 2.5%. Los resultados indican que las lecturas repetidas de un sensor fueron precisas con error estándar <3.3 mV. Sin embargo, en comparación con otro sensor del mismo modelo, se encontraron diferencias significativas ($>5\%$). Por otra parte, se logró obtener una relación entre la salida del voltaje y la humedad gravimétrica, con la cual se obtuvo una ecuación polinomial de segundo orden y se comprobó que la preparación de las mezclas influye significativamente en las lecturas del sensor, por lo que se debe de considerar la distribución no uniforme del agua y la compactación del suelo.

En un trabajo realizado por Duarte *et al.* (2021), utilizaron el sensor capacitivo v1.2 y un sensor de presión en un suelo oxisol rojo; con la finalidad de calibrar y validar los datos de humedad y tensión del agua en el suelo. El trabajo consistió en realizar mediciones en el suelo seco y saturado, empleando el método gravimétrico y las lecturas obtenidas a partir de los sensores. Los sensores fueron conectados a una placa Arduino, la cual contaba con un módulo de microSD para el almacenamiento de los datos. Al mismo tiempo, se propusieron tres modelos empíricos para calibrar y validar las mediciones: $y=ax^b$, $y=(a+bx)$ y $y=a-bc^x$, los cuales alcanzaron un error de porcentaje medio absoluto (MAPE por sus siglas en inglés, *Mean Absolute Percentage Error*) de 10, 12 y 9, y una R^2 de 0.91, 0.94 y 0.93 respectivamente, siendo el último el que obtuvo un mejor ajuste para la humedad del suelo. Sin embargo, el sensor capacitivo mostró una tendencia a



subestimar los valores elevados de humedad del suelo. Sánchez *et al.* (2019) trabajaron en la calibración de un sensor de humedad de suelo utilizando un circuito controlado mediante una placa Arduino Uno R3 para lo que se elaboró un diseño experimental basado en las relaciones agua/sustrato de fibra de coco, variando desde el sustrato seco (0:1) hasta un punto de saturación (5:1). Las mediciones se realizaron en mezclas homogenizadas y no homogenizadas para determinar el comportamiento de las lecturas del sensor. Por último, los resultados para ambas mezclas mostraron una tendencia similar, siendo la primera con un mejor ajuste a la línea de tendencia con una desviación estándar de 1.95 unidades y 3.95 para la segunda. De manera similar, Hrisko (2020) realizó un experimento para calibrar un sensor de humedad tipo capacitivo empleando fibra de coco seca. Utilizó el método gravimétrico para determinar la humedad del sustrato y luego relacionarlo con las lecturas registradas por el sensor. En este sentido, las mediciones se tomaron después de preparar una muestra donde se pesó la fibra de coco seca y posteriormente se les añadía 10 ml de agua hasta alcanzar un volumen de 200 ml. Al final, se generó un modelo del tipo: $\theta_V = \frac{2.48}{V} - 0.72$, donde θ_V es la humedad gravimétrica (cm^3/cm^3) y V es el voltaje de salida, se obtuvo un *RMSE* de 0.044 y un *MAPE* del 6%, lo que sugiere una buena capacidad predictiva del modelo en relación con los datos observados.

A diferencia de los trabajos anteriores, Chereches *et al.* (2024) desarrollaron un sistema de 28 sensores capacitivos (SKU: CE09640) distribuidos en dos multiplexores conectados a la tarjeta Arduino Mega 2560. La calibración consideró mediciones en agua de grifo con conductividad eléctrica entre 70 y 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aire y un suelo arenoso con *DA* de 1,556 kg/m^3 . Se colocaron 5,000 g del suelo en un recipiente donde se insertaron los sensores a 7cm de profundidad, la



humedad inicial fue de 0.31% y se realizó mediciones con humedad del 5% en incrementos de cinco hasta llegar al 25%. Las humedades se determinaron siguiendo las indicaciones de la Norma ISO-11465-1993 y se verificaron con una termobalanza AXIS AG120. Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indican un valor $p < 0.01$ del estadístico F de la prueba, indicando que uno o más valores son significativamente diferentes y la prueba de Tukey indica diferencias significativas en la mayoría de los casos. Por último, se propone una curva de ajuste exponencial-asintótico para la calibración general con R^2 de 0.95 y se sugiere una calibración específica de cada sensor para obtener resultados más precisos.

Control de Sistemas de Riego

Hamoodi *et al.* (2020) propusieron un sistema de riego agrícola automatizado que funciona con energía solar y controlado con una tarjeta Arduino Uno con la finalidad de reducir los costos en energía y promover el ahorro de agua. En su diseño se planteó la utilización de *hardware* y *software* libre, el cual fue programado para encender una bomba de agua cuando la humedad registrada por el sensor fuera menor al 50%. Finalmente, se logró relacionar la humedad del suelo y la tensión de salida que varió de 0 a 4.2 V, a través de una curva de variación lineal. Por su parte, Al-Obaidi *et al.* (2020) trabajaron con un sistema de riego por goteo con el objetivo de optimizar los costos, la carga laboral y uso de agua durante el riego. Para ello, diseñaron un sistema conformado principalmente por una tarjeta Arduino Uno R3, un sensor de humedad FC-28 y un conjunto de bombas. El software contó con una base de datos para indicar la cantidad de agua necesaria por planta, lo cual permitió el encendido y apagado de las bombas. El trabajo se llevó a cabo en un terreno de 1,000 m², el cual fue dividido en cuatro zonas que contaron con la misma



cantidad de sensores. Los resultados obtenidos mostraron una reducción del costo laboral (60%), facilidad de riego (75%), disminución de vegetación no deseada (70%) y aumento en el rendimiento de los cultivos (75%).

En otro trabajo, Oladipo y Ajewole (2024) establecieron un sistema de riego inteligente para la optimización y gestión de los recursos hídricos en tiempos de sequía. El sistema fue integrado por una tarjeta Arduino, sensores capacitivos, una pantalla LCD, un módulo lector de SD, bombas de agua, relés y una batería de litio para el suministro de energía. Las pruebas experimentales se realizaron en cuatro macetas con *Vigna unguiculata* como especie vegetal, los sensores se colocaron en el suelo y se programaron para encender las bombas de agua cuando se alcanzara el 30% de humedad y se desactivara hasta alcanzar el 70%. Finalmente, se concluye que el sistema es 97% más eficiente que los métodos tradicionales de riego y que su implementación a gran escala es viable, en especial en tiempos de sequía donde la disponibilidad de agua es limitada. Por otro lado, Picado Mora *et al.* (2024) calibraron el sensor capacitivo EDANA en laboratorio con un suelo de textura franca. Para ello, relacionaron las lecturas del sensor y la humedad obtenida a través del método gravimétrico, obteniendo una ecuación polinomial con R^2 de 0.95. A partir de la calibración se estableció un sistema de comunicación con la finalidad de alertar al productor de cuando abrir y cerrar las válvulas de riego, el cual funcionó con una tarjeta con módulo GSM que establece la comunicación con una tarjeta sim, la cual envía un mensaje alertando que se ha alcanzado el PMP y es momento de activar el riego y cuando se alcanza la CC indicando que hay que desactivar el riego.



Rivas-Sánchez *et al.* (2019) utilizaron diferentes sensores de bajo costo para determinar parámetros ambientales en el control y manejo de un sistema de riego por goteo automatizado en un muro verde. La unidad experimental consistió en 8 cajas de 1 m² y una profundidad de 10 cm, de las cuales la mitad fue plantada con *Lampranthus spectabilis* y la otra parte con *Aptenia cordifolia*. Como sustrato se empleó musgo *Sphagnum* y una mezcla de fibra de coco con cáscara de arroz. Para el sistema de riego automatizado se empleó una placa Arduino para controlar los sensores mientras que para encender el relé de la bomba de agua se usó el sensor FC-28 para humedad de suelo, el cual se programó a través de del IDE de Arduino con cuatro lecturas de humedad: sustrato saturado, húmedo, seco y muy seco. Como resultado, se creó una página *ThingSpeak*, en la cual se visualizó en tiempo real las condiciones de humedad y otros parámetros como la temperatura del aire, lo que permitió un mejoramiento en el crecimiento de las plantas y un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.



4. Justificación, Hipótesis y Objetivos

Justificación

La determinación de humedad en matrices sólidas es importante para aplicaciones agrícolas y de investigación, debido a que esta información permite tomar decisiones para la gestión de los recursos hídricos, la relación con los componentes presentes en las matrices, el ahorro de energía, la disminución de la carga laboral, entre otros. Sin embargo, para su medición se emplean técnicas como el método gravimétrico que requieren tiempos muy prolongados para obtener resultados, debido a que su implementación se realiza de forma manual y no es adecuada para los casos en los que se requiere el monitoreo continuo.

Para mejorar los tiempos de espera se han adaptado estrategias y nuevas tecnologías, por ejemplo, para eficientizar la obtención de resultados muchos laboratorios han adquirido termobalanzas que analizan muestras más pequeñas y calculan la humedad en tiempos más cortos a diferencia de cuando se utiliza el horno o estufas de laboratorio. Por el contrario, esta técnica no es práctica para determinaciones en campo o agrícolas, por lo que muchos utilizan equipos y sensores costosos que miden la humedad de manera instantánea. Desafortunadamente, estos equipos requieren de acciones de mantenimiento preventivo y correctivo, así como el reemplazo de sensores y otros materiales que incrementan los costos de operación con tiempos prolongados de espera para el usuario.

En la actualidad existe una variedad de recursos electrónicos de fácil asequibilidad como las tarjetas y los componentes de Arduino, que están basadas en código libre. Por ello se propone el desarrollo de un dispositivo de bajo costo basado en Arduino que permita obtener lecturas de



humedad de los medios sólidos en tiempos cortos y que sea útil para los diferentes medios sólidos de interés ambiental. Asimismo, gracias a la adaptabilidad con la que cuenta Arduino se puede utilizar tanto en el laboratorio como en el campo.

Hipótesis

La señal analógica generada por el dispositivo electrónico se puede convertir a unidades de humedad a través de una curva de calibración ajustada con diferentes calidades del agua, debido a que la humedad del suelo puede ser afectada por los diferentes parámetros presentes en el agua: pH, Temperatura, Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Conductividad Eléctrica (CE). Del mismo modo, el contenido de humedad varía según la composición y características físicas de la matriz sólida.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un dispositivo electrónico para la medición del contenido de humedad en matrices sólidas de diversos orígenes y composiciones.

Objetivos particulares

- i) Diseñar un dispositivo de medición y registro de humedad con componentes compatibles con la tarjeta electrónica Arduino.



- ii) Calibrar el dispositivo empleando diferentes calidades de agua y tipos de matrices sólidas.
- iii) Validar las mediciones del dispositivo desarrollado a través de la comparación de resultados obtenidos por análisis termogravimétrico.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



5. Materiales y Métodos

Diseño del Dispositivo Electrónico

Para el ensamblaje del dispositivo electrónico se utilizó una tarjeta Arduino Mega 2560, un reloj RTC DS3231, un módulo lector de microSD y un sensor de humedad para suelo de tipo capacitivo. El modelo comercial de sensor es el *Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0* fabricado con material anticorrosivo lo que permite un tiempo de vida útil de 3 años, tiene dimensiones largo, ancho y alto de 98, 23 y 4 mm respectivamente, el rango de operación es de 3.3 a 5.5 V y cuenta con un peso de 15 g.

La Mega 2560 funciona como controlador de los componentes periféricos conectados (RTC DS3231, módulo lector de microSD y sensor de humedad) la cual fue alimentada a través de un cable USB con conectores tipo A y B. Por otro lado, el sensor capacitivo fue conectado al pin A0, el reloj RTC en los pines SDA y SCL, el lector de microSD para almacenar la información cuenta con un bus SPI (Serial Peripheral Interface) de MOSI, MISO, SCK y CS que fueron conectados a los pines digitales 50, 51, 52 y 53 respectivamente. Así mismo, todos los componentes fueron alimentados a 5V y se enlazaron a tierra mediante el pin GND. La Figura 1 y la Figura 2 muestran el circuito electrónico y el esquema de ensamblaje del dispositivo electrónico, las cuales fueron diseñadas en el software *fritzing* versión 0.9.3 que funciona como un entorno para la creación de prototipos, diseño e iniciativa de *hardware* libre para desarrollos electrónicos.

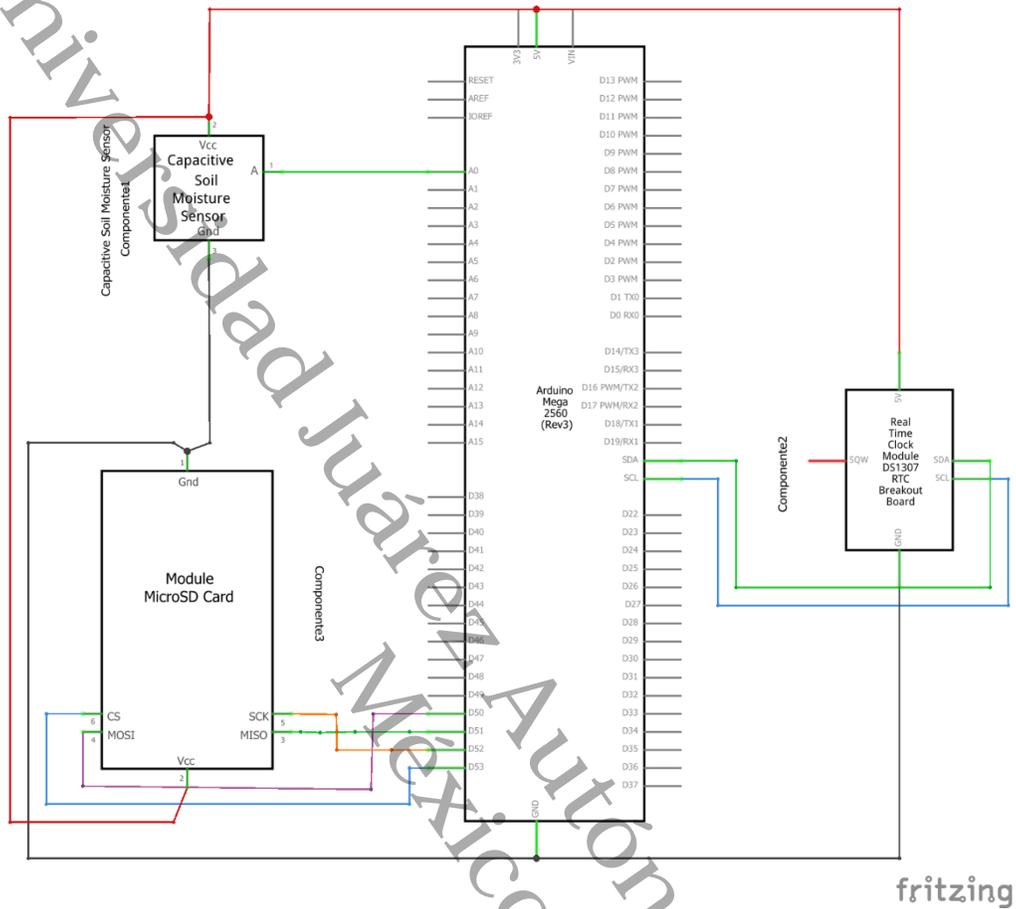


Figura 1. Circuito del dispositivo electrónico con las conexiones de los componentes a los pines correspondientes de la tarjeta Arduino 2560.

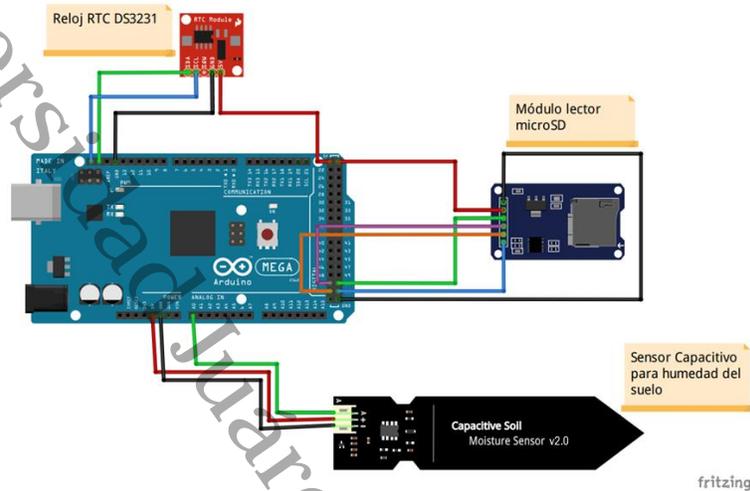


Figura 2. Esquema de ensamblaje del dispositivo controlado por la tarjeta Arduino 2560.

Para el funcionamiento del dispositivo se empleó el *software* Arduino IDE 2.2.1 donde se modificó un código (*sketch*) para el funcionamiento de los componentes periféricos del dispositivo. El *sketch* empleado se programó para poder realizar la configuración de fecha, hora y obtener las lecturas de la señal capturadas por el sensor, permitiendo guardar la información cada minuto en un archivo de texto y almacenarlos en una memoria SD de 32GB de almacenamiento.

Mediciones en Agua y Aire

Se realizaron pruebas experimentales en diferentes tipos de agua y en el aire, con la finalidad de observar influencias sobre el dispositivo. Del mismo modo, los valores de las lecturas del sensor obtenidos durante las pruebas en agua permitieron identificar el valor máximo que puede registrar el dispositivo (presencia de humedad) y los valores en las mediciones del aire, el valor mínimo (ausencia de humedad). Asimismo, con ambas pruebas se logró determinar el rango



de medición del sensor en escala arbitraria, debido a que teóricamente el dispositivo puede alcanzar un rango de valores entre 0 y 1024 unidades arbitrarias (u.a.).

Para las pruebas experimentales se utilizaron tres tipos de agua: agua destilada, agua de grifo y agua purificada; a las cuales se determinaron parámetros físicos tales como pH, T, SDT y CE, con ayuda de un potenciómetro modelo HI98130 de la marca HANNA. El procedimiento consistió en introducir en sensor capacitivo en el agua previamente vertida en un recipiente inerte, a una profundidad aproximada de 6 cm por 10 min, tiempo suficiente para que se estabilizaran las lecturas. De igual manera, se empleó un rango de temperatura del agua de 1.5 °C a 30 °C para observar variaciones en las lecturas de salida.

De manera similar se realizaron mediciones en el aire, en este caso el sensor fue sujetado con ayuda de unas pinzas para dejarlo suspendido, cuidando de no tener contacto con alguna superficie que pudiera generar alguna interferencia en los valores de lectura. Las pruebas experimentales en el aire duraron 10 min para asegurar estabilidad en las lecturas del sensor y se tomaron en cuenta factores que pudieran influir en los valores de las lecturas, tales como la temperatura ambiente, humedad relativa y fuerzas de convección natural y forzadas.

Selección de Matrices Sólidas

Se eligieron tres suelos diferentes y un sustrato como matrices sólidas con características minerales diferentes: a) suelo limoso (SL) de la población de Vainilla, municipio de Nacajuca (Figura 3), b) suelo franco arenoso (SFA) obtenido en la R/A Acachapan 2da Sección del municipio del Centro con georreferencia 18°02'50.9"N, 92°48'45.1"W (Figura 4), c) suelo arcilloso (SA) de un predio ubicado en la carretera Villahermosa-Macuspana con georreferencia



de $18^{\circ}00'08.6''N$, $92^{\circ}52'05.1''W$ (Figura 5) y d) sustrato procesado de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) con agrolita (SUST) proporcionado por el Laboratorio de Bioprocesos de la DACBIOL.



Figura 3. Sitio de recolección del suelo limoso de un predio de Vainilla en Nacajuca, Tabasco.



Figura 4. Sitio de recolección del suelo franco arenoso en Acachapan y Colmena, Centro, Tabasco.



Figura 5. Sitio de recolección del suelo arcilloso en un predio de Villahermosa-Macuspana, Tabasco.

Los suelos se tamizaron con ayuda de tamices ASTM de la marca ALCON, el No. 4 (4.76 mm) y el No. 8 (2.38 mm), con el que se obtuvo un tamaño promedio de partícula de 3.57 mm. Seguidamente se procedió al secado mediante ventilación natural y exposición a luz solar y, posteriormente, se tomó una muestra de cada tipo de matriz sólida para determinar los parámetros de porosidad, densidad aparente, densidad de partículas y retención de agua; a través de la metodología de Porómetros de Pire y Pereira (2003).

Método de Porómetros

El método propuesto por Pire y Pereira (2003) para obtener las características físicas (porosidad total, porosidad de aireación, la densidad aparente y la densidad de las partículas), consiste en la utilización de porómetros fabricados a partir de tubos de Policloruro de Vinilo (PVC), los cuales en la parte inferior contienen una tapa plástica con orificios de 5 mm que permiten el drenado de agua. Por el contrario, para retener el agua dentro de los porómetros se utilizan unos tapones que sellen los orificios inferiores. El procedimiento del método consiste en pesar los porómetros vacíos en una balanza analítica, luego se coloca el suelo y se golpean cuatro



veces dejándolos caer suavemente desde una altura aproximada de 7 cm para asegurar una buena distribución dentro de los porómetros y no dejar espacios vacíos, seguidamente son pesados y se les cubre la parte superior con una tela filtrante. Por último, los porómetros son sumergidos en agua durante 24 horas.

Una vez transcurrido el tiempo, se les colocan los tapones en cada uno de los orificios dejando reposar durante 30 min, luego son retirados del agua, se les toma el peso nuevamente y los porómetros son colocados dentro de una nevera hermética de manera vertical sobre un vaso de precipitados durante 12 min; con la finalidad de obtener el drenado. Finalmente, se toma entre 1 a 5 g de la muestra la cual es colocada en una termobalanza para obtener la humedad presente en la muestra y con los datos obtenidos se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{Porosidad total, } PT (\%) \quad PT = 100 \frac{V_a \frac{W_h - W_s}{\gamma_a}}{V_c} \quad (5)$$

$$\text{Porosidad de aireación, } PA (\%) \quad PA = 100 \frac{V_a}{V_c} \quad (6)$$

$$\text{Densidad aparente, } DA (kg/m^3) \quad DA = \frac{W_s}{V_c} \quad (7)$$

$$\text{Densidad de partículas, } DP (kg/m^3) \quad DP = \frac{DA}{1 - \frac{PT}{100}} \quad (8)$$



Donde V_a es el volumen drenado (cm^3); W_h es el peso húmedo de la muestra (g); W_s es el peso seco de la muestra; γ_a es el peso específico del agua y V_c es el volumen del tubo o cilindro (cm^3).

Determinación de Mezclas

Debido a que no existe una metodología específica para la calibración del dispositivo, de manera similar que Sánchez *et al.* (2019) se trabajó con la relación suelo/agua de una mezcla de suelo o sustrato humectada. Para ello, se consideró la humedad presente en la muestra seca la cual se determinó como humedad inicial (*HI*) y la humedad máxima que se alcanza cuando la muestra es saturada con agua, la cual se midió en términos de capacidad de campo (*CC*). Para cada matriz sólida las humedades fueron determinadas con ayuda de una termobalanza AND MF-50 Moisture Analyzer, las cuales se utilizaron para obtener el rango de humedad que pueden alcanzar, siendo *HI* la medida inferior y la *CC* la superior del rango.

A partir de ambos datos se establecieron las relaciones suelo/agua y sustrato/agua que a su vez se permitió calcular las proporciones de matriz sólida y agua necesarias para obtener una curva de calibración del dispositivo y preparar 5 mezclas diferentes. Esto se logró con ayuda de *Microsoft Excel* donde se realizaron los cálculos necesarios para el rango de humedad en el suelo y el tamaño de intervalo que se determinaron mediante la Ecuación 9 y 10.

$$\text{Rango} = CC - HI \quad (9)$$

$$\text{Tamaño de intervalo} = \frac{\text{Rango}}{n} \quad (10)$$



Donde n es el número de mediciones intermedias que se quieren realizar.

Mediciones en Matrices Sólidas

Se reciclaron botellas de plástico como contenedores inertes que se cortaron a una altura aproximada de 9 cm de alto a las cuales previamente se les tomó el peso vacío en una balanza analítica (AND GR-300 Gemini Autocalibrating Analytical Balance). Posteriormente se pesó la masa necesaria para preparar las mezclas establecidas de las matrices sólidas, considerando tres repeticiones para cada una. Mientras que, para la humectación se utilizó una bandeja cubierta con papel aluminio la cual fue colocada encima de una balanza digital (OHAUS Valor™ serie 5000 – V51PH15), donde la muestra se colocó y extendió sobre la superficie de la bandeja; luego, se le agregó agua de manera homogénea con un atomizador hasta alcanzar el peso de la mezcla.

Posteriormente la mezcla se regresó al recipiente, donde se compactó cuidadosamente dejando caer cinco veces a una altura aproximada de 7 cm, se pesó en la balanza analítica para confirmar que se haya alcanzado el peso de la mezcla preparada y para determinar pérdidas en el traspaso. Se esperó por 5 min con la finalidad de que el agua se adhiriera en la muestra, una vez transcurrido el tiempo, se introdujo el sensor capacitivo a una profundidad de 6 cm para realizar la medición con el dispositivo electrónico durante 5 min. Finalmente, la muestra se llevó a la termobalanza donde se colocaron 3 g y se determinó la humedad gravimétricamente.

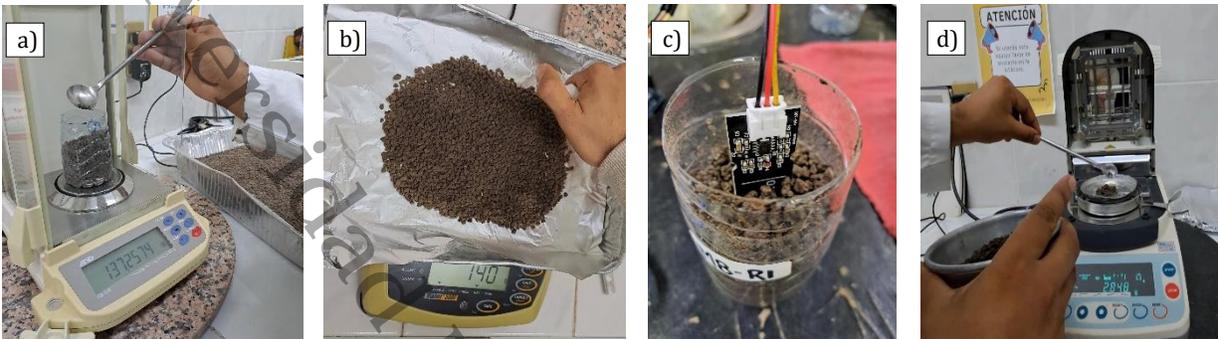


Figura 6. Procedimiento para la determinación experimental de la humedad del suelo. En la figura, a) peso de las muestras; b) humectación del suelo; c) lecturas con el sensor capacitivo; d) determinación de la humedad con la termobalanza.

Modelos Empíricos y Análisis Estadístico

La información obtenida en el dispositivo fue almacenada en la memoria SD y posteriormente se recuperó en un archivo de *Microsoft Excel* para formar una base de datos para el análisis estadístico posterior. En el tratamiento de datos, se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Una vez verificada la normalidad, los datos se analizaron con medidas de tendencia central (media, desviación estándar, varianza) y se utilizó el coeficiente de Pearson para los datos distribuidos normalmente para un análisis de bondad de ajuste. Además, para el análisis estadístico y presentación gráfica de resultados se empleó el *software* Sigmaplot 15.0 (Grafiti LLC, California, USA).

También se propusieron modelos lineales, lineal múltiple, polinomial y un modelo sigmoidal, para crear curvas de calibración para el dispositivo.



Modelos de lineales

Los modelos de regresión lineal buscan explicar la relación que existe entre dos o más variables aleatorias, siendo capaz de predecir en mayor o menor grado los valores de una variable a partir de otra. Se puede utilizar el modelo de regresión lineal simple representado de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + e \quad (11)$$

Donde X y Y son variables del modelo, β_0 y β_1 constantes y e se considera como error de muestreo. Mientras que el modelo de regresión lineal múltiple se representa por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_k X_k + e \quad (12)$$

Donde las k son valores independientes (García Pérez, 2008). La Ecuación 11 se adaptó para correlacionar los valores obtenidos del sensor y otros parámetros con la humedad (Y) y las constantes se calcularon para cada matriz sólida. Mientras que el modelo de regresión múltiple se usó para realizar un ajuste por calidad de agua considerando SDT, CE, pH y temperatura.

Modelo polinomial

La regresión polinomial se utilizó para predecir la respuesta del sensor a partir de la relación con la humedad presente en las matrices sólidas, esta técnica estadística permite modelar la relación entre ellas como una función polinomial de orden n , en este caso se utilizó una modelo polinomial de segundo orden.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + e \quad (13)$$



Donde Y es la variable dependiente (humedad), X es la variable independiente (lectura del sensor), β_0 , β_1 y β_2 son parámetros del modelo y e es el error.

Modelo sigmoidal.

Los modelos sigmoidales son caracterizados porque la evolución de sus datos toma la forma de una "S" cuando son graficados, esto se debe a un crecimiento lento al inicio y al final de sus datos. El modelo de Gompertz, el cual ha sido adaptado para diferentes aplicaciones, se caracteriza por tener una curva inicial más dispersa que la función logística, y se representa de la forma:

$$x(t) = ae^{-be^{-ct}} \quad (14)$$

Donde x es la variable dependiente, t es la variable independiente, mientras que a , b y c son parámetros del modelo (Barrigüete, 2007). La ecuación fue adaptada para predecir la humedad en las matrices sólidas resultando como:

$$h = ae^{-be^{-cr}} \quad (15)$$

Donde h es el contenido gravimétrico de agua en %, r es la lectura del sensor y los parámetros del modelo son a , b y c .

Los parámetros de los modelos anteriores pueden ser ajustados con base en las propiedades físicas de los suelos y el sustrato a un modelo que integre las cuatro matrices sólidas empleadas. Por consiguiente, se realizaron pruebas mediante el Optimizador *Solver*® de *Microsoft Excel* para los tres modelos empleados y finalmente se seleccionó el modelo de Gompertz el cual tuvo



resultados ligeramente superiores. El modelo integrado permite replicar los resultados de humedad de las matrices sólidas a partir de propiedades físicas fácilmente medibles (porosidad y densidad aparente) en el laboratorio,

Para evaluar los modelos se emplearon las métricas de bondad de ajuste error absoluto (*MAE*), error cuadrático medio (*RMSE*), error porcentual medio absoluto (*MAPE*) y el error estándar promedio (*S_e*):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (16)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (17)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - x_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (18)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y_i - x_i)^2}{n - k}} \quad (19)$$

Donde y_i son los valores reales, x_i son los valores predichos, n es el número de observaciones y k es el número de los parámetros estimados. Las métricas de bondad de ajuste cuantifican el nivel del error y ayudan a determinar la confiabilidad del modelo para predecir las humedades de las matrices sólidas estudiadas.

6. Resultados y Discusión

Dispositivo Electrónico Ensamblado

El dispositivo electrónico ensamblado se muestra en la Figura 7 donde se observa la tarjeta Mega 2560 de Arduino como controlador de los componentes periféricos que lo integran. Al final, se obtiene un sistema funcional para la captura de información de la humedad del suelo programado en el software IDE de Arduino.

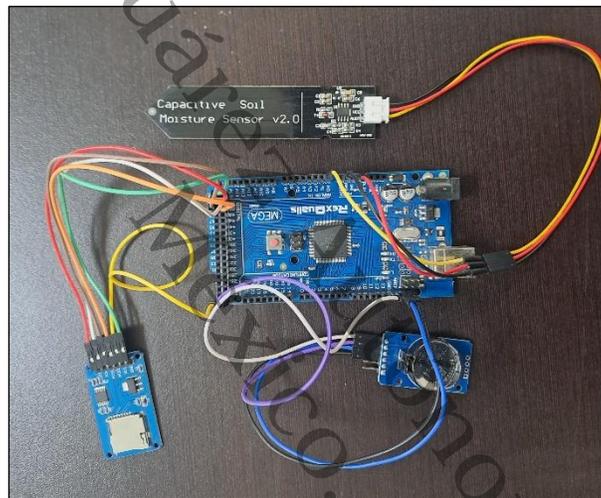


Figura 7. Dispositivo electrónico ensamblado.

En la Figura 8, a la izquierda se muestra parte de *sketch* que se programó para el funcionamiento del dispositivo con el cual se puede capturar y almacenar la información a través del microcontrolador donde es cargado, mientras que, del lado derecho se muestran las lecturas del dispositivo durante su funcionamiento en la pantalla de salida. El *sketch* demostró ser funcional para la obtención de las lecturas registradas por el sensor capacitivo, cumpliendo con lo que le fue indicado en su programación. Además, el entorno de desarrollo IDE de Arduino es

simple de utilizar y permite la modificación del dispositivo para predecir la humedad en tiempo real y presentarla en la pantalla, lo cual hace más eficiente al dispositivo propuesto.

a)

```
Humedad_SD_may27a.ino
1 #include <SPI.h>
2 #include <SD.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <RTClib.h>
5
6 #define SENSOR A0
7 int Humedad;
8
9 #define CSpin 53
10
11 RTC_DS3231 rtc;
12
13 File archivo;
14
15 void setup() {
16 // put your setup code here, to run once:
17 Serial.begin(9600);
18 rtc.begin();
19 //rtc.adjust(DateTime(2024,01,30,11,56,00));
20
21 Serial.println("Inicializando tarjeta ...");
22 if (!SD.begin(CSpin)) {
23 Serial.println("Fallo en la inicialización!");
24 return;
25 }
26 Serial.println("Inicialización correcta");
27 }
28
29 void loop() {
30 Humedad = analogRead(A0);
31 DateTime now = rtc.now();
32
33 Serial.print(now.day());
34 Serial.print('/');
35 Serial.print(now.month());
36 Serial.print('/');
37 Serial.print(now.year());
38 Serial.print(", ");
39 }
```

b)

```
Humedad_SD_may27a.ino
1 #include <SPI.h>
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Mega or Mega 2560' on 'COM4')
Inicializando tarjeta ...
Inicialización correcta
7/5/2024,20:6:40,613
7/5/2024,20:7:10,606
7/5/2024,20:7:40,607
7/5/2024,20:8:10,607
7/5/2024,20:8:40,607
7/5/2024,20:9:10,607
7/5/2024,20:9:40,606
7/5/2024,20:10:10,607
7/5/2024,20:10:40,606
7/5/2024,20:11:11,606
7/5/2024,20:11:41,605
7/5/2024,20:12:11,607
7/5/2024,20:12:41,362
7/5/2024,20:13:11,360
7/5/2024,20:13:41,359
7/5/2024,20:14:11,358
7/5/2024,20:14:41,357
7/5/2024,20:15:11,359
7/5/2024,20:15:41,357
7/5/2024,20:16:11,356
7/5/2024,20:16:41,357
7/5/2024,20:17:11,357
7/5/2024,20:17:41,356
7/5/2024,20:18:11,355
7/5/2024,20:18:41,358
7/5/2024,20:19:11,357
7/5/2024,20:19:41,357
7/5/2024,20:20:12,357
7/5/2024,20:20:42,358
7/5/2024,20:21:12,359
7/5/2024,20:21:42,358
7/5/2024,20:22:12,356
7/5/2024,20:22:42,357
7/5/2024,20:23:12,358
```

Figura 8. Pantalla de la plataforma de desarrollo Arduino IDE: a) muestra el código de programación y b) muestra la pantalla de lecturas del dispositivo electrónico.

Pruebas Preliminares

Respuesta del dispositivo electrónico

La respuesta del sensor capacitivo se determinó mediante el tiempo en que las lecturas capturadas por el dispositivo se estabilizaron durante la experimentación en agua, pasando de un entorno seco a un entorno húmedo. Para ello, se registraron los valores medidos cada 10 s, lo que permitió observar el tiempo mínimo de espera para la estabilización del dispositivo. En la Figura 9 se presenta la respuesta del dispositivo en función del tiempo y muestra que su estabilización



comienza después de 1 min de haber sido introducido el sensor en la muestra. Esto coincide con Schwambach *et al.* (2023) quienes encontraron una respuesta casi inmediata y con Hrisko (2020) el cual recomienda la espera de 1 a 5 min para que la señal del dispositivo se estabilice antes de tomar una lectura confiable. Debido a esto, se consideró esperar un tiempo de 2 min para realizar una lectura confiable. A pesar de ello, el tiempo de medición es más rápido en comparación con otros métodos empleados para determinar la humedad del suelo.

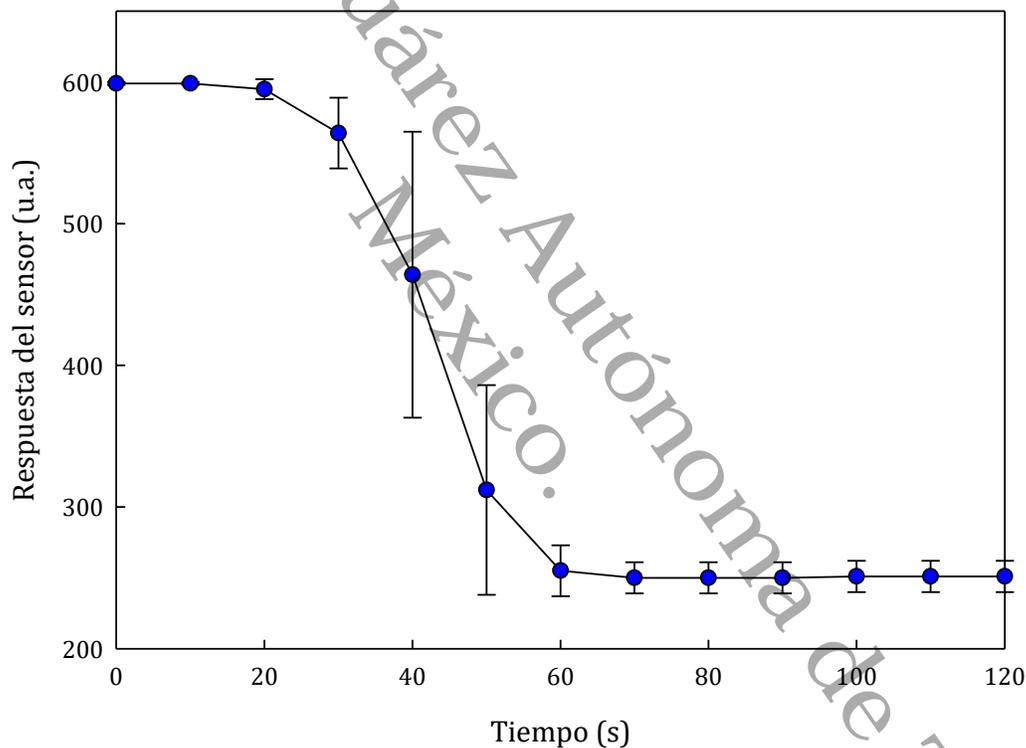


Figura 9. Tiempo de estabilización del sensor en las lecturas de un entorno seco a húmedo ($n=6$).

Pruebas de medición en agua.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones con el dispositivo electrónico con los mínimos y máximos de los parámetros de calidad del agua.



Tabla 1. Caracterización de los diferentes tipos de agua usados para la calibración del dispositivo

Tipo de agua	Registro del sensor (u.a.)	Calidad del agua							
		T (°C)		pH		CE (µs/cm)		SDT (ppm)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Agua de grifo	241 ± 2	3.5	31.0	6.6	7.5	410	939	205	468
Agua purificada	257 ± 5	1.5	30.5	6.6	7.9	98	208	49	104
Agua destilada	284 ± 1	6.0	28.0	8.6	8.6	24	24	12	12

De manera general, la temperatura del agua no representó ningún efecto significativo en las lecturas del sensor capacitivo, el cual puede funcionar a temperaturas de -40 °C a 85 °C según las especificaciones del fabricante. Sin embargo, al ser comparadas por el tipo de agua, se encontró una correlación moderada con R^2 de 0.507 para el agua de grifo y 0.637 para el agua purificada. De forma similar, se ha estudiado el efecto de la temperatura del suelo sobre el sensor, donde Aranda *et al.* (2022) encontraron correlaciones lineales significativas en los registros de los sensores capacitivos SoilWatch y Catnip con R^2 de 0.825 y 0.954 respectivamente, por lo que la temperatura puede generar un ligero efecto en las lecturas de humedad en el suelo (Okasha *et al.*, 2021; González-Teruel *et al.*, 2019). Por otro lado, el pH alcanzó una correlación R^2 de 0.84 y la CE con los SDT obtuvieron una R^2 de 0.744. La determinación de la CE del agua agregada es importante debido a que esta influye sobre la CE del suelo, lo que puede generar incrementos en los valores de la constante dieléctrica aparente (ϵ_r) y generar que los sensores capacitivos sobreestimen la humedad del suelo, conllevando a problemas de precisión, debido a esto Zemni *et al.* (2019) sugieren un ajuste que considere la CE para la calibración de este tipo de sensores.



A partir de lo anterior, y con los resultados de las mediciones en agua se observó una diferencia en las lecturas del sensor debido a la calidad del agua, esto permitió realizar un modelo de regresión lineal múltiple considerando el efecto de la calidad del agua en las lecturas del dispositivo. Para el modelo se emplearon los parámetros de T, pH, CE y SDT de la forma siguiente:

$$r_w = aSDT + bCE + cpH + dT + e \quad (20)$$

donde r_w es la lectura del sensor corregida por el efecto de la calidad del agua (u.a.) y a , b , c , d y e son parámetros de correlación. El modelo alcanzó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.943$ y la capacidad de correlación se observa en la Figura 10.

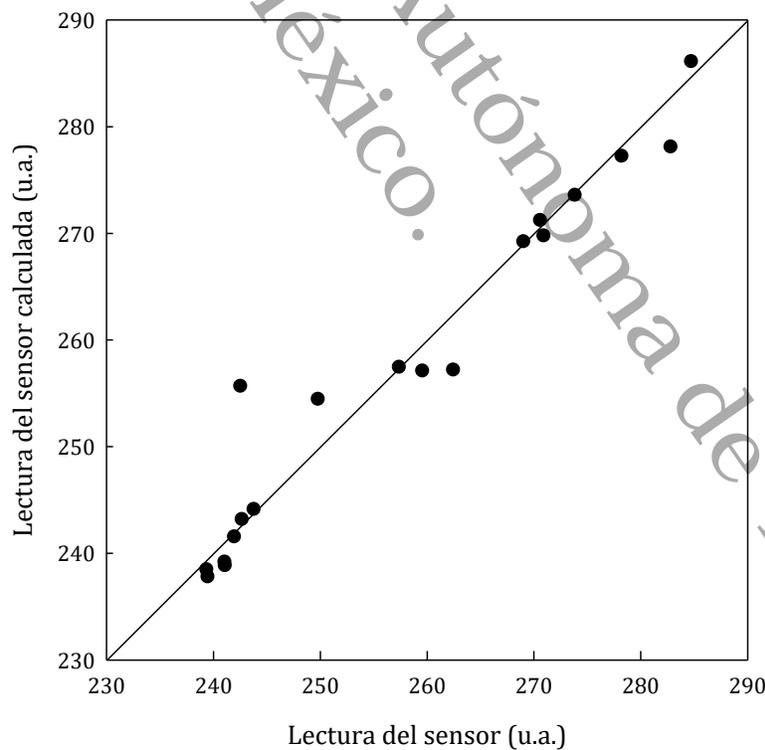


Figura 10. Relación entre las lecturas del dispositivo y el modelo de ajuste por calidad del agua.



En la tabla siguiente se muestran los valores de los parámetros del modelo propuesto donde se considera la influencia por calidad del agua. Se considera que los parámetros de calidad del agua pueden afectar las lecturas del sensor, por lo que se acepta una de las hipótesis planteadas en este trabajo.

Tabla 2. Valores de los parámetros del modelo de regresión lineal de calidad de agua

Parámetros del modelo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Valor	-1.544	0.744	9.86	-0.363	204.202

Pruebas de medición en aire

Para determinar la influencia en el sensor por fuerzas de convección natural en ausencia de humedad, se realizaron pruebas durante 10 min en el exterior con un flujo libre del aire, donde el sensor fue colocado sobre una base impidiendo el contacto con alguna superficie. Del mismo modo, se procedió para fuerzas por convección forzada; donde se utilizó el aire acondicionado y un ventilador para generarlas. Se utilizó un termohigrómetro HTC-2 para medir la humedad relativa del aire del exterior (59%) y del interior (39%). También se registró una temperatura de 32 – 37 °C para el exterior y 23 – 28 °C en el interior. Se observó que el sensor tuvo poca variación durante la experimentación en aire, siendo 597 ± 5 u.a. el valor promedio registrado. Por lo que, las fuerzas de convección no influyeron significativamente sobre el sensor. Esto se puede explicar debido a que el sensor capacitivo mide la constante dieléctrica de los materiales por contacto y, a diferencia del agua que su ϵ_w es elevada (~80 a 25 °C), el aire tiene una $\epsilon_w = 1$.



Con la experimentación en los medios de interés, agua y aire, se determinó el rango de medición que puede registrar el dispositivo electrónico, siendo 597 u.a. el extremo superior (ausencia de humedad) y 261 u.a. en promedio para el inferior (con presencia de humedad). Sin embargo, en el extremo inferior se alcanzó una lectura mínima de 241 u.a. con agua de grifo, por lo que pueden existir una variabilidad en las lecturas inferiores debido al tipo de agua. Esto puede ser generado por una mayor sensibilidad del sensor cuando se presenta los límites en condiciones húmedas y cuando entra en contacto en suelos con niveles muy bajos de humedad, como sucedió con la matriz SL que alcanzó lecturas de 514 u.a. a 528 u.a. Al respecto, Schwamback *et al.* (2023) encontraron alta variabilidad cuando el sensor fue probado en un suelo saturado con lecturas en el rango de 215 u.a. a 295 u.a. Por otro lado, Radi *et al.* (2018) caracterizaron el mismo modelo de sensor con lecturas de 260 u.a. en condiciones muy húmedas y 520 u.a. en entornos secos. Mientras que, Chereches *et al.* (2024) obtuvieron valores similares con valores mínimos de 190 u.a. a 216 u.a. y de 483 u.a. a 514 u.a. para entornos húmedos y secos respectivamente, lo cual sugiere la importancia de realizar una caracterización de los rangos de lecturas del sensor seleccionado.

Determinación de Humedad en Matrices Sólidas

Caracterización de las matrices sólidas.

Los resultados obtenidos en la caracterización de las propiedades físicas a través del método de porómetros se muestran en la Tabla 3, siendo la CC, la humedad máxima que puede retener cada matriz sólida.



Tabla 3. Caracterización de las propiedades físicas de las matrices sólidas

Propiedades físicas	Matriz sólida			
	Suelo limoso (SL)	Suelo franco arenoso (SFA)	Suelo arcilloso (SA)	Sustrato (SUST)
Porosidad total, PT (%)	49.6 ± 2.4	52.3 ± 0.4	52.5 ± 1.7	55.4 ± 2.9
Porosidad de aireación, PA (%)	2.9 ± 1.8	8.4 ± 0.8	0.8 ± 0.3	8.7 ± 2.7
Densidad aparente, DA (g/cm ³)	1.0 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.2 ± 0.0
Densidad de partículas, DP (g/cm ³)	1.9 ± 0.1	1.6 ± 0.0	1.8 ± 0.1	0.4 ± 0.0
Capacidad de campo, CC (%)	34.6 ± 0.5	37.1 ± 0.2	38.8 ± 2.5	72.6 ± 0.2

Las propiedades físicas del suelo han sido estudiadas para determinar su influencia en las mediciones con sensores capacitivos y así considerarlas en su calibración. De las propiedades físicas determinadas para las matrices sólidas se encontró una relación lineal moderada ($R^2 = 0.76$) entre la PT y la CC de los suelos y el sustrato. Mientras que la DA tuvo una relación lineal más significativa con la CC ($R^2=0.972$). Con respecto al sensor, se empleó una relación lineal de la salida del sensor en función de la porosidad a una humedad de 31.69%, donde se encontró una relación negativa moderada ($R^2=0.68$) y con respecto a la DA se encontró una relación significativa ($R^2=0.924$). La porosidad puede generar afectaciones en las mediciones del sensor debido a una distribución no uniforme del contenido de agua en los poros de las muestras, lo que puede llevar a imprecisiones en las mediciones (Placidi *et al.*, 2020). Por otra parte, la DA de las matrices sólidas ha sido una variable estudiada para la calibración de los sensores para humedad del suelo. Por ejemplo, Parvin y Degré (2016) reportaron que algunos sensores capacitivos pueden ser más sensibles a los componentes de un suelo y a su DA , mientras que Pereira *et al.* (2022) reportaron



que el sensor calibrado considerando la *DA* subestimó la humedad del suelo, independientemente del tipo de la textura y la *DA*.

Para la calibración del dispositivo se consideró la humedad de las matrices sólidas después de ser sometidas a secado como el límite inferior de humedad y la *CC* como el límite superior de humedad. En la Tabla 4 se muestra la humedad gravimétrica de las matrices sólidas, consideradas como humedades iniciales para los suelos y el sustrato.

Tabla 4. Humedad gravimétrica inicial de las matrices sólidas

Matriz Sólida	Humedad gravimétrica (%)
Suelo limoso (SL)	6.98 ± 0.1
Suelo franco arenoso (SFA)	5.40 ± 0.1
Suelo arcilloso (SA)	5.23 ± 0.3
Sustrato (SUST)	5.80 ± 0.9

A partir de la humedad inicial y la *CC*, se establecieron relaciones entre las matrices sólidas y el agua, para formar diferentes mezclas que permiten obtener los datos necesarios para calibrar el dispositivo electrónico. Las mezclas se establecieron por el tamaño del recipiente y considerando la profundidad suficiente para insertar el sensor de manera correcta. Así mismo, las mezclas propuestas se presentan en la Tabla 5, donde se indica las relaciones de suelo-agua y sustrato-agua que se establecieron para formar una mezcla. De igual manera, se presenta el peso final para cada mezcla de las matrices sólidas.



Tabla 5. Mezclas propuestas con su relación matriz sólida - agua

No. De Mezcla	Relación Matriz Sólida/agua (g/g)			
	Suelo limoso (SL)	Suelo franco arenoso (SFA)	Suelo arcilloso (SA)	Sustrato (SUST)
1	11.50	13.86	13.85	6.05
2	9.33	10.13	10.38	4.50
3	7.16	6.41	6.91	2.66
4	5.00	4.55	3.44	1.75
5	2.82	2.69	2.64	0.44
Mezcla total (g)	150	200	200	55

Calibración del dispositivo

Se realizó la prueba de Shapiro-Wilk a los resultados registrados por el dispositivo electrónico en la medición de humedad de las matrices sólidas, donde se obtuvieron valores $P > 0.05$ para los suelos y el sustrato empleado, los cuales no mostraron una desviación significativa de los datos, por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) determinando que los datos se distribuyen normalmente. Sin embargo, SL alcanzó el valor más bajo ($P=0.052$) con un valor del coeficiente estadístico $W=0.891$ encontrándose en el límite de ser considerados como distribución normal. SFA tuvo el valor más alto ($P=0.863$) con $W=0.965$. Mientras que, SA obtuvo un coeficiente $W=0.84$ con $P=0.112$ y para SUST, W fue de 0.864 y P alcanzó un valor de 0.242.

Debido a la distribución normal de los datos, se determinó la relación entre los valores de humedad obtenidos mediante el análisis termogravimétrico y los registrados por el dispositivo, los cuales disminuyeron conforme la humedad de las muestras aumentó, la prueba del coeficiente de



Pearson (r_p) confirmó una relación negativa con r_p de -0.947 , -0.992 , -0.981 y -0.991 para SL, SFA, SA y SUST, respectivamente. Estos valores coinciden con lo encontrado con Brum *et al.* (2024) los cuales reportaron una fuerte correlación negativa para la mayoría de las muestras analizadas. Esta correlación permitió analizar los datos de manera lineal. Por otra parte, los valores se ajustaron a través de una ecuación polinomial de segundo orden, los cuales fueron evaluados con coeficientes de determinación R^2 , encontrando valores superiores de 0.89. De igual manera, se utilizó la ecuación de Gompertz la cual ajustó adecuadamente los datos, alcanzando R^2 de 0.816, 0.923, 0.934 y 0.932 para SL, SFA, SA y SUST respectivamente.

Sin embargo, para mejorar las métricas de los modelos se aplicó una transformación lineal cambiando la dirección de la pendiente (Ecuación 21), lo que permitió realizar un mejor análisis de los datos reduciendo los sesgos de predicción de los modelos de calibración generados. Se obtuvieron tres curvas de calibración (lineal, polinomial y sigmoideal) para predecir el comportamiento de la humedad en las matrices sólidas y seleccionar la que mejor ajuste los valores de humedad con las lecturas proporcionadas por el sensor, para ser considerada en el modelo integrado. En la Figura 11 se muestran las curvas de calibración obtenidas para las cuatro matrices sólidas.

$$r = r_{s,max} - r_s \quad (21)$$

Donde r es la lectura del sensor calculada que alimenta a los modelos, r_s es la lectura del sensor registrada y $r_{s,max}$ es la lectura máxima del sensor obtenida durante la experimentación en el aire.

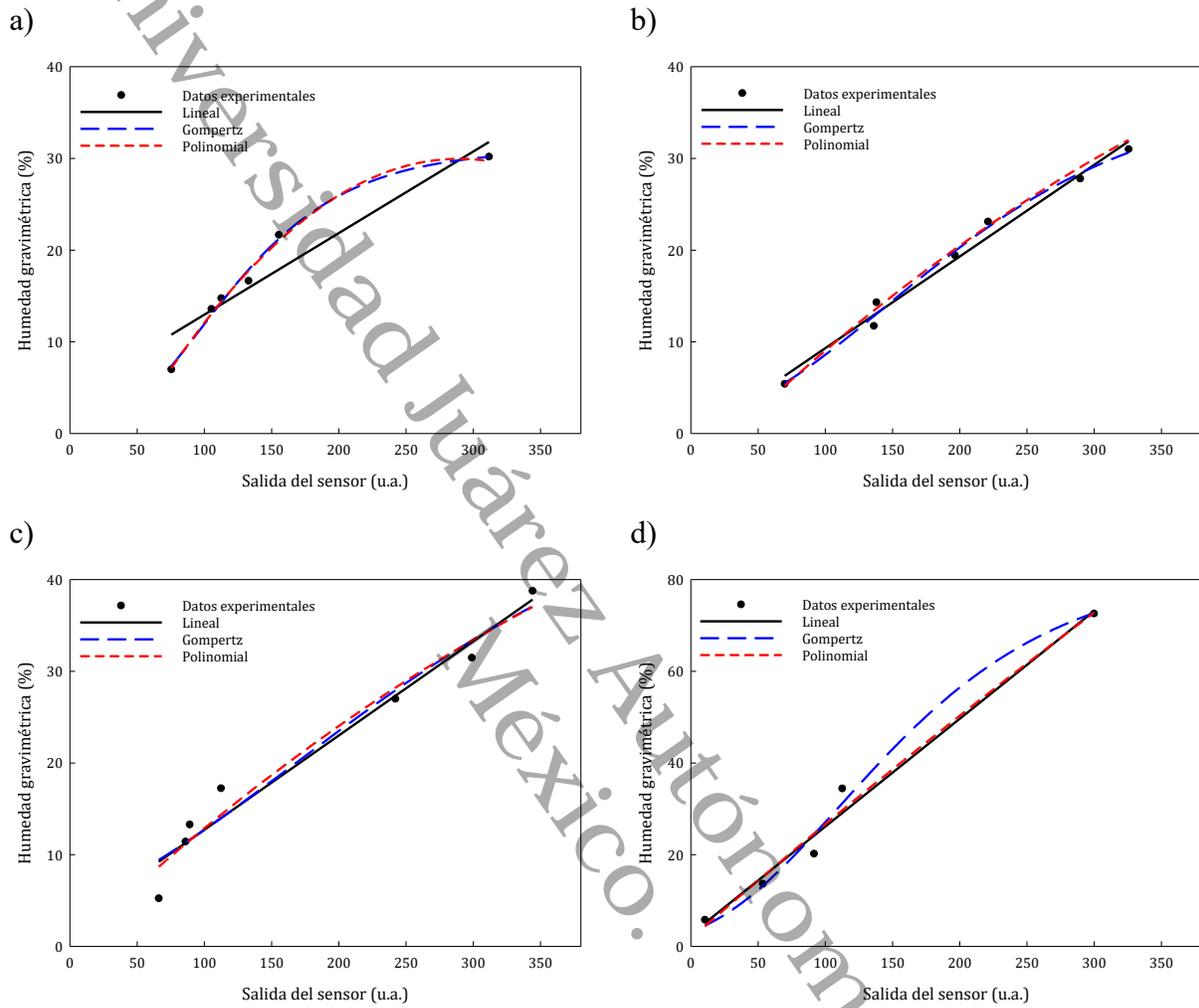


Figura 11. Curvas de calibración del dispositivo electrónico para las diferentes matrices sólidas: a) suelo limoso; b) suelo franco arenoso; c) suelo arcilloso y d) sustrato, con las ecuaciones lineales, polinomiales de segundo orden y modelo de Gompertz.

En la Tabla 6 se presentan las ecuaciones obtenidas por cada método con el nivel de correlación alcanzado y las métricas con las que se evaluaron.



Tabla 6. Ecuaciones obtenidas para cada matriz sólida con sus métricas de bondad de ajuste.

Matriz Sólida	Ecuación	Métricas				
		MAE	RMSE	MAPE	R ²	S _e
SL	Lineal $h=0.089r+4.0649$	1.79	2.32	14.56	0.897	2.84
	Polinomial $h=-11.853+0.2892r-0.0005r^2$	0.55	0.62	3.27	0.993	0.88
	Gompertz $h=31.0471e^{-5.0648e^{-0.0167r}}$	0.52	0.63	3.74	0.992	0.90
SFA	Lineal $h=0.1001r-0.7022$	0.97	1.05	7.00	0.985	1.24
	Polinomial $h=-4.4081+0.1445r-0.0001r^2$	0.85	0.96	5.17	0.991	1.27
	Gompertz $h=37.7082e^{-3.5371e^{-0.0087r}}$	0.64	0.74	4.03	0.992	0.98
SA	Lineal $h=0.1029r+2.4283$	1.73	2.18	16.90	0.962	2.58
	Polinomial $h=-0.0818+0.1385r-8.9083 \times 10^{-5}r^2$	1.88	2.12	16.14	0.964	2.80
	Gompertz $h=57.4488e^{-2.5185e^{-0.0051r}}$	1.91	2.34	18.10	0.956	3.09
SUST	Lineal $h=0.2351r+2.6426$	2.42	3.07	11.93	0.983	3.97
	Polinomial $h=1.7569+0.2549r-5.9847 \times 10^{-5}r^2$	2.46	3.04	14.29	0.983	4.80
	Gompertz $h=83.1168e^{-3.2502e^{-0.0107r}}$	1.86	2.44	11.14	0.989	3.86

Nota. h es la humedad gravimétrica (%) y r representa la lectura del sensor (u.a.). Además, se muestran los resultados de las métricas de bondad de ajuste: MAE, RMSE, MAPE y S_e.

La calibración del sensor debe de considerar la textura de suelo debido a que esta puede generar interferencias en el proceso de calibración, por lo que se debe de realizar un proceso de calibración específica para cada sensor tal como ha señalado Parvin y Degré (2016) y Chereches *et al.* (2024). La correlación lineal para la matriz SL alcanzó una R² de 0.897, el más bajo en comparación con la correlación obtenida con la ecuación polinomial de segundo orden y el modelo de Gompertz que alcanzaron una R²>0.99 siendo casi idénticas (Tabla 6). Lo que coincide con Adla *et al.* (2020), los cuales evaluaron el funcionamiento del sensor SMC300 en dos suelos francos limosos y obtuvo una correlación lineal con R²=0.75 y R²=0.89 para los suelos, además, el RMSE fue de 4.2 y 2.61. En el mismo trabajo se evaluó el sensor SM100, el cual tuvo una correlación R² de 0.95 y 0.91 con RMSE promedio de 2.4, lo que indica que la calibración lineal



no es la alternativa más adecuada para este tipo de suelo. Por otro lado, Parvin y Degré (2016) obtuvieron una mejor correlación ($R^2 > 0.90$) con funciones polinomiales de segundo orden, la cual ajustaron mejor los datos para un suelo limoso evaluado con muestras a diferentes profundidades, pudiendo explicar hasta un 98% la variabilidad de los datos. Para la matriz SFA, el modelo de Gompertz fue el que ofreció mejor correlación en todas las métricas evaluadas. De igual manera, la ecuación polinomial de segundo orden demostró buenos resultados, mejorando los reportados por Pereira *et al.* (2022), el cual obtuvo un promedio de R^2 ajustada de 0.90, además, Brum *et al.* (2024) han recomendado el uso de la ecuación polinomial de segundo orden en los suelos que presentan drenajes rápidos y poca retención de agua como suelos francos arenosos y arenosos. Sin embargo, Radi *et al.* (2018) propusieron una calibración con un modelo potencial para el sensor, la cual demostró buenos resultados con $R^2 > 0.93$.

La mejor correlación entre las lecturas del sensor con las humedades termogravimétricas se obtuvo con la matriz SA con coeficientes R^2 de 0.962, 0.964 y 0.956 para la ecuación lineal, polinomial y sigmoideal, respectivamente, siendo la ecuación lineal y la polinomial de segundo orden con mejores resultados al igual que en términos de *MAE* y *RMSE* (Tabla 6). En cuanto al *MAPE*, las tres formas de calibración obtuvieron valores entre 16 y 18%, que a pesar de ser los valores más altos en comparación con los obtenidos en las otras matrices sólidas; se consideran como modelos con buena predicción. Resultados similares reportó Duarte *et al.* (2021) que calibraron un sensor capacitivo de bajo costo en un Oxisol rojo, para el que utilizó una ecuación exponencial con $R^2 = 0.94$, *RMSE* de 0.029 y *MAPE* de 12%. De igual manera, González-Teruel *et al.* (2019) evaluaron el funcionamiento de sensores capacitivos en dos suelos arcillosos, donde



la ecuación exponencial generó los mejores resultados ($R^2=0.965$ para el suelo 1 y $R^2=0.959$ para el suelo 2 con $RMSE$ de 2.99 y 2.503 respectivamente) para su aplicación. Estos autores utilizaron la ecuación de segundo orden y una ecuación sigmoïdal, las cuales no mostraron mejores correlaciones. Por su parte, Okasha *et al.* (2021) reportaron R^2 entre 0.96 y 0.98 con un modelo lineal para cuatro sensores capacitivos lo que concuerda con los 0.962 encontrados para la matriz SA (Tabla 6). Esta tendencia lineal puede ser explicada debido a que los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua ligada a sus partículas, por lo que tienen menos agua libre y su drenaje es lento, lo que permite al sensor tener más tiempo de contacto con el agua presente en el suelo y determinar los cambios de humedad (Brum *et al.*, 2024). Por otro lado, Pereira *et al.* (2022) obtuvieron buenos resultados con un polinomio de segundo orden donde el sensor trabajó a 3.3 V con R^2 entre 0.93 y 0.97. Sin embargo, cuando se empleó una alimentación de 5.5 V, los coeficientes R^2 estuvieron en un rango de 0.86 y 0.88, lo que sugiere que la corriente de alimentación del sensor puede generar variaciones en las lecturas registradas. En cuanto a la matriz SUST, el modelo de Gompertz obtuvo las mejores métricas en comparación con los otros dos métodos empleados, cabe señalar que se debe de tener cuidado cuando se trabaje con sustratos, debido a que el funcionamiento del sensor depende de la composición de la matriz sólida (Nagahage *et al.* 2019). En cuanto a la calibración en sustratos como sustitutos de suelo se ha trabajado poco, Hrisko (2020) trabajó con fibra de coco y logró calibrar el sensor mediante una ecuación lineal con $RMSE=0.044$ y $MAPE$ del 6%, siendo más preciso en comparación con los valores de $RMSE=2.44$ y $MAPE$ de 11% obtenidos con el modelo de Gompertz (Tabla 6). Sánchez *et al.* (2019) sugieren que, para tener un mejor ajuste lineal, se debe de homogenizar el sustrato



con el agua hasta alcanzar un punto de uniformidad, lo que ayuda a reducir la dispersión de los datos.

El modelo de Gompertz se empleó debido a que puede representar el proceso físico real del comportamiento de humedad del suelo y permite una mejor predicción en los extremos de las matrices sólidas. Cuando se presenta un estado seco en los suelos, la infiltración inicialmente es lenta debido a su composición o su grado de compactación, a medida que el agua se infiltra en los poros la humedad aumenta progresivamente hasta alcanzar su punto de saturación donde la tasa de cambio de humedad disminuye significativamente, presentando cambios mínimos en la curva que se aplanan cerca de su valor límite, lo que se refleja en la salida del sensor como lo descrito por Schwambach *et al.* (2023). Esto sugiere que el modelo de Gompertz puede presentar una ventaja ante las limitaciones de modelos lineales y polinomiales, que no pueden modelar con precisión estos cambios de humedad en el punto de saturación y en un punto inicial seco.

En general, los tres modelos de calibración son satisfactorios para correlacionar los tres tipos de suelo, pero solamente el modelo de Gompertz permite correlacionar los datos para el sustrato al mismo nivel que para los suelos. El método lineal presentó los coeficientes de determinación más bajos por lo que, para fines prácticos de análisis de laboratorio, no son recomendables. Con respecto a la capacidad de otros modelos empíricos, el modelo polinomial y de Gompertz son superiores al modelo lineal. En particular, el modelo de Gompertz fue menos satisfactorio que el modelo polinomial para la matriz SA, pero fue especialmente útil para correlacionar datos de la matriz SUST. Sin embargo, los modelos polinomiales suelen ser más



empleados debido a que pueden generar valores precisos, mientras que los modelos sigmoidales no suelen utilizarse para la calibración de estos dispositivos.

Del mismo modo, se obtuvieron curvas de calibración considerando el modelo de ajuste por los parámetros calidad de agua (Ecuación 20), lo que permitió ajustar las lecturas del dispositivo mediante la siguiente ecuación:

$$r_a = r_{s,max} - \left[r_s \left(\frac{r_{s,max} - r_w}{r_w} \right) - r_w \right] \quad (22)$$

Donde r_a es la lectura del sensor ajustada por la influencia de la calidad del agua que alimenta a los modelos.

La calibración que consideró el ajuste por influencia de calidad de agua mostró mejoría en la ecuación lineal para el suelo limoso, mejorando el coeficiente de determinación R^2 hasta 0.963 y reduciendo el error. De igual manera, para el suelo arcilloso hubo mejorías en las métricas para la ecuación polinomial de segundo orden y el modelo de Gompertz lo que tenían $MAPE$ de 16 y 18% respectivamente, hasta un $MAPE$ de 5% como se muestra en la Tabla 7. Sin embargo, para el SFA y SUST los valores no mejoraron, presentando un incremento en el valor de los errores.

A partir de los modelos de calibración se lograron transformar las unidades arbitrarias proporcionadas por el dispositivo a una escala física de humedad para las matrices sólidas, por lo

que se acepta la hipótesis planteada. De igual manera, se comprobó que existe influencia de los parámetros de calidad del agua que pueden tener influencias en las lecturas del dispositivo.

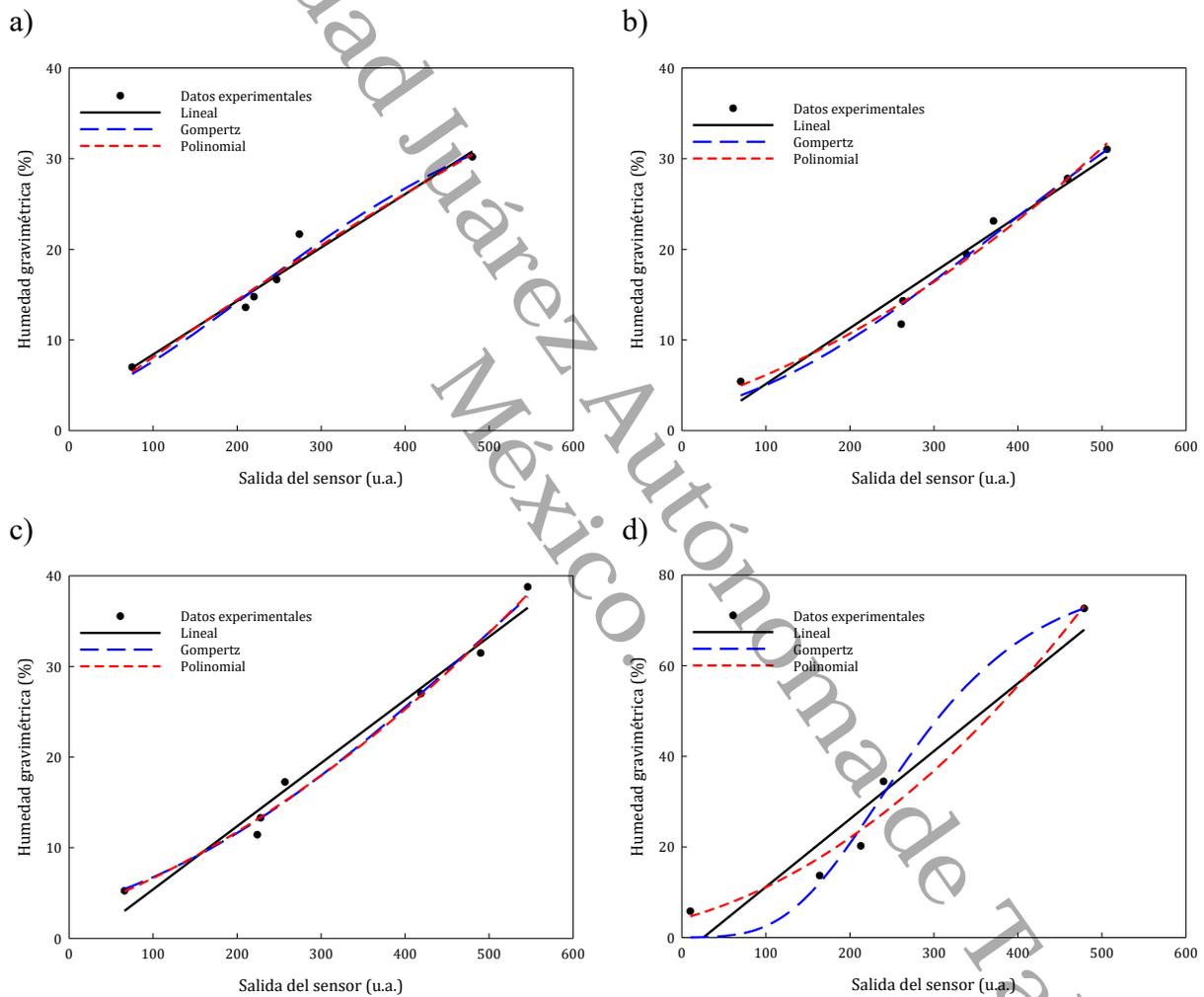


Figura 12. Curvas de calibración del dispositivo considerando la Influencia por calidad de agua. Se consideró la influencia de los parámetros de calidad del agua para la calibración de las matrices sólidas: a) suelo limoso; b) suelo franco arenoso; c) suelo arcilloso y d) sustrato.



Tabla 7. Ecuaciones y métricas de la calibración para las matrices sólidas considerando la influencia de los parámetros de calidad de agua

Matriz Sólida	Ecuación	Métricas				
		MAE	RMSE	MAPE	R ²	S _e
SL	Lineal $h=0.059r_a+2.482$	1.01	1.40	5.56	0.963	1.71
	Polinomial $h=1.403+0.0682r_a-2\times 10^{-5}r_a^2$	1.10	1.43	6.75	0.964	2.03
	Gompertz $h=40.9401e^{-2.65e^{-0.0046r_a}}$	1.03	1.25	6.90	0.970	1.76
SFA	Lineal $h=0.0617r_a-1.0317$	1.34	1.65	12.28	0.961	1.95
	Polinomial $h=2.6764+0.0288r_a+5.6475\times 10^{-5}r_a^2$	0.87	1.21	6.00	0.980	1.60
	Gompertz $h=59.4092e^{-3.4357e^{-0.0033r_a}}$	0.82	1.15	7.99	0.982	1.52
SA	Lineal $h=0.0697r_a-1.5749$	1.53	1.70	12.77	0.977	2.01
	Polinomial $h=2.6632+0.0343r_a+5.5663\times 10^{-5}r_a^2$	0.89	1.18	5.11	0.989	1.56
	Gompertz $h=105.3058e^{-3.4271e^{-0.0022r_a}}$	0.94	1.22	5.47	0.988	1.62
SUST	Lineal $h=0.1498r_a-3.8039$	6.00	6.40	48.65	0.926	8.26
	Polinomial $h=4.1648+0.0498r+0.0002r_a^2$	3.40	3.98	17.70	0.971	6.30
	Gompertz $h=80.2458e^{-8.8158e^{-0.0094r_a}}$	2.85	3.46	27.80	0.984	5.46

Validación de Modelos Propuestos

Para la validación se utilizó el suelo franco arenoso, suelo arcilloso y sustrato, donde se empleó un diseño completamente aleatorizado y dos tipos de agua: agua de grifo (tipo de agua 1: $T=30^{\circ}\text{C}$, $pH=8.23$, $CE=462$, $SDT=231$) y agua de purificada (tipo de agua 2: $T=30.4^{\circ}\text{C}$, $pH=8.27$, $CE=245$, $SDT=123$) para determinar la influencia por la calidad de agua (ICA). Se realizó una prueba de *t-student* a los valores de humedad gravimétrica y los calculados por los tres modelos propuestos, donde el modelo de Gompertz mostró menos diferencias estadísticas, seguido por el modelo polinomial de segundo orden y por último el modelo lineal que tuvo las mayores diferencias estadísticas. En la Tabla 8 se presentan los resultados de la prueba *t-student* del modelo de Gompertz con $n=3$.



Tabla 8. Diferencia estadística de los valores generados por las curvas de calibración y las curvas considerado el ajuste por influencia de calidad de agua con el modelo de Gompertz

Matriz Sólida	Tipo de agua	Humedad (%)				p de prueba t-student		Diferencia estadística	
		Gravimétrica	Gompertz				Efecto de la calidad del agua		
			Sin/E	Con/E	Sin/E	Con/E	Sin/E	Con/E	
SFA	Seca	5.57 ± 0.29	5.03 ± 0.6	-	0.23	-	No	-	
SFA	1	16.60 ± 0.33	14.94 ± 0.77	15.60 ± 0.57	0.03	0.06	Si	No	
SFA	1	23.67 ± 0.50	25.79 ± 1.63	18.09 ± 0.56	0.10	0.24	No	No	
SFA	2	17.58 ± 0.29	15.46 ± 0.76	25.05 ± 1.79	0.01	0.27	Si	No	
SA	Seca	4.23 ± 0.22	8.08 ± 0.69	-	0.00	-	Si	-	
SA	1	15.83 ± 0.18	11.78 ± 0.51	11.89 ± 0.38	0.00	0.00	Si	Si	
SA	1	23.17 ± 0.33	23.48 ± 2.10	21.31 ± 1.90	0.81	0.17	No	No	
SA	2	22.62 ± 0.67	20.67 ± 0.72	20.98 ± 0.61	0.03	0.04	Si	Si	
SUST	Seca	3.58 ± 0.06	3.51 ± 0.11	-	0.39	-	No	-	
SUST	1	26.80 ± 1.24	31.63 ± 3.91	30.24 ± 4.28	0.11	0.25	No	No	
SUST	1	46.17 ± 0.55	43.97 ± 1.34	43.69 ± 1.44	0.06	0.04	No	Si	
SUST	2	46.40 ± 0.20	44.70 ± 3.82	51.41 ± 3.46	0.49	0.07	No	No	

Nota. Se incluyen los valores de humedad del suelo sin agregar agua (muestra seca). Así mismo, se evalúa el efecto de la calidad del agua: sin efecto de la calidad del agua (Sin/E) y con efecto de la calidad del agua (Con/E).

La calidad del agua es un factor poco estudiado en los trabajos consultados, siendo la CE el parámetro considerado en algunos casos. Para el suelo franco arenoso (SFA) empleando el tipo de agua 1, se encontraron diferencias significativas ($P=0.027$) en la humedad gravimétrica de 17% sin considerar un ajuste por influencia por calidad de agua, lo mismo sucedió con el tipo de agua 2. Sin embargo, considerando un ajuste por calidad de agua no se encontraron diferencias significativas a través de la prueba *t-student*, mientras que para el suelo arcilloso (SA) se encontraron las mayores diferencias entre los grupos de datos evaluados. Por último, el sustrato (SUST) solo presentó una diferencia significativa considerando el ajuste por la influencia de calidad de agua ($p=0.050$) en la humedad de 46%. De manera similar, Chereches *et al.* (2024) encontraron diferencias significativas en la mayoría de los valores de humedad en un suelo arenoso y estas diferencias se redujeron cuando el contenido de humedad era mayor del 15%.



En la Figura 13 se muestra la relación 1:1 de la humedad gravimétrica de las matrices SFA, SA y SUST, con la humedad calculada por el modelo de Gompertz. Si se considera el ajuste por calidad de agua el modelo ajusta correctamente los datos para las tres matrices sólidas con R^2 promedio de 0.991 y un error promedio de 9%, aunque se debe de considerar válidos en humedades superiores al 15%. Cuando no se considera el ajuste por calidad de agua, el modelo es aceptable para predecir la humedad de las matrices sólidas, inclusive cuando se encuentran en un estado seco, alcanzando una $R^2=0.989$ y un error promedio de 16%, el cual se elevó debido a la matriz SA. En comparación con Pereira (2022), los resultados del modelo de Gompertz ajustan mejor los datos que el polinomio de segundo orden que tendió a subestimar los valores de humedad.

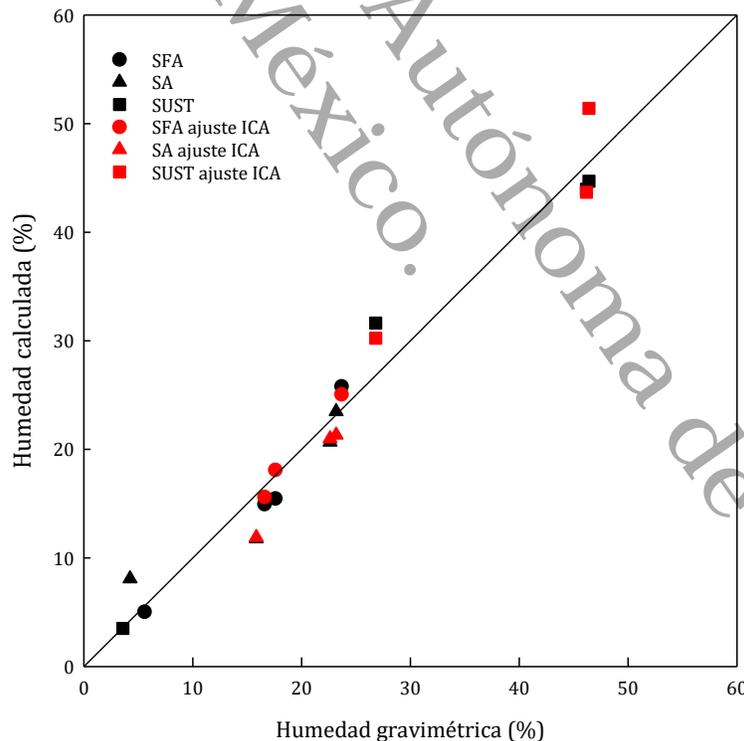


Figura 13. Relación de la humedad gravimétrica con la humedad calculada para las matrices sólidas. Se comparan los valores de primera instancia con los calculados considerando la influencia de calidad de agua (ICA).



Modelo Integrador Propuesto

A partir del modelo de Gompertz se generó un modelo que integra las ecuaciones de calibración de cada matriz sólida a partir de la relación entre los valores de los parámetros que alimentan al modelo y las propiedades físicas de las matrices sólidas: porosidad y densidad aparente. Esto permitió determinar numéricamente los parámetros a , b y c de Gompertz en función de la porosidad y la densidad aparente a partir del Optimizador *Solver*® de *Microsoft Excel*. De esta forma, los parámetros de Gompertz pueden representarse por correlaciones lineales múltiples:

$$a = a_0 + a_1P + a_2DA + a_3 \left(\frac{P}{DA} \right) \quad (23)$$

$$b = b_0 + b_1P + b_2DA + b_3 \left(\frac{P}{DA} \right) \quad (24)$$

$$c = c_0 + c_1P + c_2DA + c_3 \left(\frac{P}{DA} \right) \quad (25)$$

Donde P (en %) es la porosidad, DA (en g/cm^3) es la densidad aparente de la matriz sólida y los demás parámetros se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Valores de los parámetros del modelo propuesto

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
a_0	-1038.81520	b_0	85.36801	c_0	0.30342
a_1	16.25297	b_1	-1.35923	c_1	-0.00515
a_2	245.83371	b_2	-12.72041	c_2	-0.03263
a_3	0.55270	b_3	-0.01437	c_3	-6.5374×10^{-6}



Con los valores de la Tabla 9 se calcularon los nuevos valores para los parámetros a , b y c de cada matriz sólida de acuerdo con las Ecuaciones (23) a (25), demostrando que no existe un error significativo al momento de utilizar la porosidad y la densidad aparente. Es por ello, que se optó en emplear esta forma para la calibración final del dispositivo sin considerar la influencia del agua, lo cual se añadió al código mediante la plataforma Arduino IDE para que el dispositivo genere la información en tiempo real. Los valores de humedad obtenidos con esta forma se presentan en la Figura 14, que replican a los valores obtenidos inicialmente.

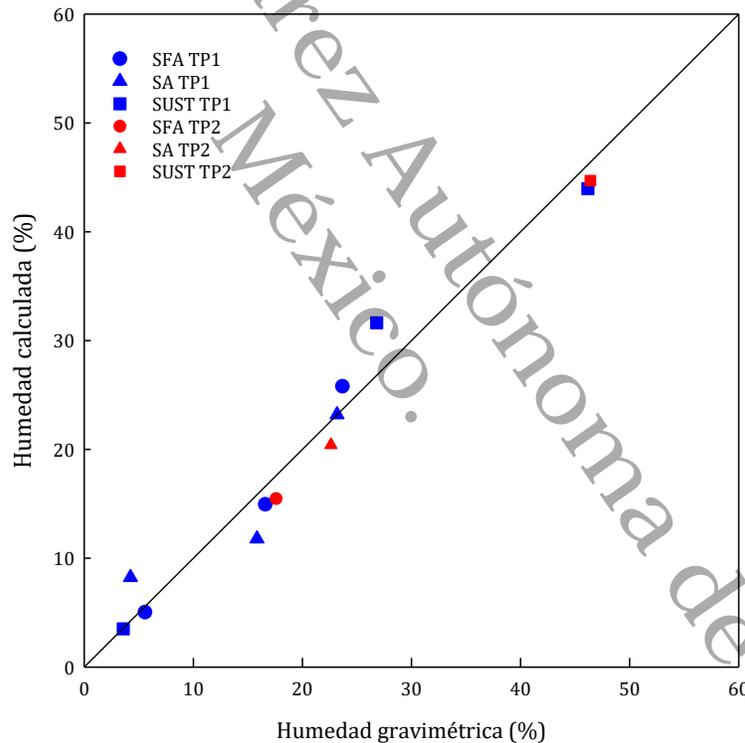


Figura 14. Relación de la humedad gravimétrica con los valores calculados por el modelo integrador. El color azul representa el tipo de agua 1 y el color rojo el tipo de agua 2.



El modelo integrado a partir de Gompertz permite el cálculo de los parámetros obtenidos en la calibración individual del dispositivo para cada matriz sólida, lo que asegura la precisión obtenida durante la calibración y a diferencia de un modelo universal de forma lineal como lo propuesto por Schwambach *et al.* (2023) el modelo integrado considera propiedades físicas fácilmente medibles permitiendo mejoras en las restricciones que se pueden presentar por el modelo lineal, así como considerar los cambios lentos que se presentan al inicio de la curva en un entorno seco del suelo y al final cuando se alcanza la saturación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



7. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El dispositivo electrónico controlado con la tarjeta Arduino 2560 y alimentado a 5 V, demostró un buen rendimiento para medir la humedad del suelo a través de un sensor capacitivo en diferentes matrices sólidas.

El dispositivo puede obtener valores de humedad en tiempos cortos, por lo que es ideal cuando se requieren valores de humedad en el menor tiempo posible.

Los parámetros de la calidad del agua influyen moderadamente sobre las lecturas registradas por el dispositivo propuesto. Sin embargo, la CE del agua puede alterar la CE del suelo, por lo que si la CE del agua es significativa puede generar variación en las lecturas del dispositivo.

La precisión del dispositivo fue satisfactoria en términos de las métricas de bondad de ajuste, lo que indica que la implementación del dispositivo es funcional y puede ser utilizado como una alternativa cuando no se cuenta con un equipo establecido para medir la humedad del suelo. Sin embargo, es importante calibrar el dispositivo en cada matriz sólida para tener mejores resultados.

La calibración del dispositivo con los tres modelos de correlación obtuvo resultados de exactitud alta para el suelo franco arenoso, una exactitud moderada para el suelo arcilloso y el sustrato con el modelo de Gompertz y lineal obtuvieron una exactitud alta y una exactitud moderada con el polinomio de segundo orden. Esto sugiere que el modelo de Gompertz y lineal pueden generar resultados aceptables para el suelo franco arenoso y el sustrato, mientras que el polinomio solo es satisfactorio para el suelo franco arenoso.



La calibración del dispositivo empleando diferentes calidades de agua mejoraron la diferencia estadística para el suelo franco arenoso. Mientras que, para el suelo arcilloso y el sustrato no mostraron mejoría en la validación.

El rendimiento del dispositivo electrónico fue aceptable sin considerar un ajuste por calidad de agua con un error promedio de 16% y satisfactorio considerando la influencia de calidad de agua con un error promedio del 9%.

Las propiedades de las matrices sólidas influyen significativamente sobre las lecturas del dispositivo, la porosidad total y la densidad aparente mostraron una relación con la humedad y las lecturas del dispositivo, así también se debe de considerar el nivel de compactación y la profundidad de inserción del sensor en el suelo.

Se propuso un modelo que integrara las cuatro matrices sólidas considerando sus propiedades físicas fácilmente medibles, con el cual se logró ajustar un modelo general para calcular los parámetros del modelo de Gompertz.

Recomendaciones

Calibrar el dispositivo para la matriz sólida con la que se va a trabajar, se pueden utilizar los modelos propuestos en matrices con características similares a las empleadas en este estudio.

Considerar el nivel de compactación para mejorar la precisión de las lecturas. Al momento de insertar el sensor, se debe tomar de la parte superior sin alterar el circuito e insertarlo a 7 cm de profundidad de forma vertical. Del mismo modo, revisar que las conexiones del circuito estén correctamente en los pines indicados y evitar salpicaduras de agua las partes expuestas del circuito.



8. Referencias

- Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. *Sensors*, 20(2), 363. DOI:[10.3390/s20020363](https://doi.org/10.3390/s20020363)
- Al-Obaidi, M. A. M., Radhi, M. A. H., Ibrahim, R. S., & Sutikno, T. (2020). Technique Smart Control Soil Moisture System to Watering Plant Based on IoT with Arduino Uno. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(5), 2038-2044. DOI: [10.11591/eei.v9i5.1896](https://doi.org/10.11591/eei.v9i5.1896)
- Aranda, D., Tapia, A., & Millan, P. (2022). Calibración y Caracterización de Sensores Capacitivos de Bajo Coste para la Monitorización de Humedad de Suelo. En *XLIII Jornadas de Automática: Libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja)* (2022a ed., pp. 479–485). Servicio de Publicaciones da UDC. DOI: [10.17979/spudc.9788497498418.0479](https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0479)
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2021). *Getting Started with Arduino: The Open-Source Electronics Prototyping Platform*. Maker Media.
- Barrigüete, J. L. A. (2007). *Externalidades de Red en la Economía Digital: Introducción a la Modelización de Mercados de Redes Mediante la Teoría de Sistemas Dinámicos*. Marcial Pons.
- Bertoletti, P. (2019). *Proyectos con ESP32 y LoRa*. Editora BCN.
- Brum, M. L., Rodrigues, P. E. C., Martins, J. D., & Swarowsky, A. (2024). *New insights on measuring soil water content in arduino plataform*. DOI: [10.21203/rs.3.rs-3777467/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3777467/v1)



- Chereches, I. A., Gaspar, F., & Danci, I. A. (2024). Designing and Calibration of a Low-Cost Multi-Point Soil Moisture Monitoring System for Precision Agriculture. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 245-254. DOI: [10.35633/inmateh-72-23](https://doi.org/10.35633/inmateh-72-23)
- de Oliveira, S. (2021). *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi 2a edição: Atualizado para ESP32*. Novatec Editora.
- Dembowski, K. (2013). *Raspberry Pi – das Handbuch*. Springer.
- Duarte, T. F., da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Koetz, M. (2021). Using Arduino Sensors to Monitor Vacuum Gauge and Soil Water Moisture. *Dyna-Columbia*, 88(219), 190-196. DOI: [10.15446/dyna.v88n219.94121](https://doi.org/10.15446/dyna.v88n219.94121)
- Fares, A., Awal, R., & Bayabil, H. K. (2016). Soil Water Content Sensor Response to Organic Matter Content under Laboratory Conditions. *Sensors*, 16(8), 1239. DOI: [10.3390/s16081239](https://doi.org/10.3390/s16081239)
- García Pérez, A. (2008). *Estadística Aplicada: Conceptos Básicos*. UNED.
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., & Soto-Valles, F. (2019). Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor. *Sensors*, 19(3), 491. DOI: [10.3390/s19030491](https://doi.org/10.3390/s19030491)
- Hamoodi, S. A., Hamoodi, A. N., & MHaydar, G.M. (2020). Automated Irrigation System Based on Soil Moisture Using Arduino Board. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(3), 870-876. DOI: [10.11591/eei.v9i3.1736](https://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1736)



- Hrisko, J. (2020). Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing. *Technical Report*. DOI: [10.13140/RG.2.2.36214.83522](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36214.83522)
- López Aldea, E. (2016). Arduino. Guía Práctica de Fundamentos y Simulación. RA-MA Editorial.
- Lugo Espinosa, O., Villavicencio Pérez, G. A. & Díaz Luna, S. A. (2014). Paquete Tecnológico para el Monitoreo Ambiental en Invernaderos con el Uso de Hardware y Software Libre. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 77-84.
- Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. DOI: [10.1109/itecha.2017.8101926](https://doi.org/10.1109/itecha.2017.8101926)
- McCarty, L. B., Hubbard, L. R., & Quisenberry, V. L. (2016). Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies. *Springer*.
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M., & Taboada, M. Á. (2018). Efectos del Fuego en la Matriz del Suelo. Consecuencias sobre las Propiedades Físicas y Mineralógicas. *Ecología Austral*, 28(1), 012-027. DOI: [10.25260/ea.18.28.1.0.127](https://doi.org/10.25260/ea.18.28.1.0.127)
- Misra, Y. (2021). Programming and Interfacing with Arduino. CRC Press.
- Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System. *Agriculture*, 9(7), 141. DOI: [10.3390/agriculture9070141](https://doi.org/10.3390/agriculture9070141)



- Navarrete, Ó. A., Quechol, G. T., & Herrera, G. G. (2011). Software Propietario vs Software Libre: Una Evaluación de Sistemas Integrales para la Automatización de Bibliotecas. *Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología e Información*, 25(54), 37. DOI: [10.22201/ibi.0187358xp.2011.54.27480](https://doi.org/10.22201/ibi.0187358xp.2011.54.27480)
- Okasha, A. M., Ibrahim, H. G., Elmetwalli, A. H., Khedher, K. M., Yaseen, Z. M., & Elsayed, S. (2021). Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management. *Sensors*, 21(16), 5387. DOI: [10.3390/s21165387](https://doi.org/10.3390/s21165387)
- Oladipo, I. O., & Ajewole, P. O. (2024). A Smart Irrigation Water Application System Based on Arduino Platform. *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*, 11(2), 132-140. DOI: [10.9734/ajahr/2024/v11i2320](https://doi.org/10.9734/ajahr/2024/v11i2320)
- Osman, K. T. (2013). *Soils: Principles, Properties and Management*. Springer.
- Parihar, Y. S. (2019). Internet of Things and Nodemcu. *Journal of Eemerging Technologies and Innovative Research*, 6(6), 1085.
- Parvin, N., & Degré, A. (2016). Soil-Specific Calibration of Capacitance Sensors Considering Clay Content and Bulk Density. *Soil Research*, 54(1), 111. DOI: [10.1071/sr15036](https://doi.org/10.1071/sr15036)
- Pearce, J. M. (2013). *Open-Source lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Elsevier.



- Pereira, R. M., Sandri, D., & Silva Júnior, J. J. D. (2022). Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the Cerrado, Brazil. *Revista Engenharia na Agricultura - REVENG*, 30, 262–272. DOI: [10.13083/reveng.v30i1.14017](https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.14017)
- Picado Mora, E., Araya Quesada, D., Ruiz Granados, N., & Sibaja Granados, J. (2024). Emisión de Datos del Sensor de Humedad “EDANA” para la utilización en diferentes labores Agrícolas. *Investiga.TEC*, 17(50), 10–15. DOI: [10.18845/itec.v17i50.7160](https://doi.org/10.18845/itec.v17i50.7160)
- Pire, R. R., & Pereira, A. (2003). Propiedades Físicas de Componentes de Sustratos de Uso Común en la Horticultura del Estado Lara, Venezuela. Propuesta Metodológica. *Bioagro*, 15(1), 55-64.
- Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. *Sensors*, 20(12), 3585. DOI: [10.3390/s20123585](https://doi.org/10.3390/s20123585)
- Qin, F., & Dai, X. (2013). Rapid BeagleBoard Prototyping with MATLAB and Simulink. Packt Pub Limited.
- Quesada Roldán, G. (2015). Producción de Chile Dulce en Invernadero Bajo Diferentes Niveles de Agotamiento en la Humedad del Sustrato. *Agronomía Costarricense*. DOI: [10.15517/rac.v39i1.19542](https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19542)
- Radi, Murtiningrum, Ngadisih, Muzdrikah, F. S., Nuha, M. S., & Rizqi, F. A. (2018). Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193). *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 1–6. DOI: [10.1109/ICSTC.2018.8528624](https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528624)



- Rivas-Sánchez, Y. A., Moreno-Pérez, M. F., & Cañas, J. R. (2019). Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls. *Sustainability*, 11(3), 782. DOI: [10.3390/su11030782](https://doi.org/10.3390/su11030782)
- Sánchez, E., Ruiloba, P. R. P., Morales, L. M. L., & Erick, E. (2019). Calibración de Sensor de Humedad Aplicado a Sustrato de Fibra de Coco Comercial Comandado por Programación en ARDUINO. *Revista de Iniciación Científica*, 5, 92-99. DOI: [10.33412/rev-ric.v5.0.2392](https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2392)
- Sánchez, P. A. (2019). Properties and Management of Soils in the Tropics. Cambridge University Press.
- Schmidt, M. (2012). Raspberry Pi: A Quick-start Guide.
- Schwambach, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy. *Sensors*, 23(5), 2451. DOI: [10.3390/s23052451](https://doi.org/10.3390/s23052451)
- Sharma, P. K., & Kumar, S. (2023). Soil Physical Environment and Plant Growth: Evaluation and Management. Springer.
- Shukla, M. K. (2023). Soil Physics: An Introduction, Second Edition (2a ed.). CRC Press.
- Souza, G., De Faria, B. T., Gomes Alves, R., Lima, F., Aquino, P. T., & Soininen, J.-P. (2020). Calibration Equation and Field Test of a Capacitive Soil Moisture Sensor. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 180–184. DOI: [10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277634](https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277634)



- Susha Lekshimi S. U., Singh D. N. & Shojaei Baghini M. (2014). A Critical Review of Soil Moisture Measurement. *Measurement*, 54, 92-105. DOI: [10.1016/j.measurement.2014.04.007](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007)
- Terzic, E., Terzic, J., Nagarajah, R., & Alamgir, M. (2012). A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments. Springer.
- Villegas Torres, O. G., Domínguez Patiño, M. L., Albavera Pérez, M., Andrade Rodríguez, M., Sotelo Nava, H., Martínez Rangel, M. G., Aguilar Cortés, M., Castillo Carpintero, C., & Magadan Salazar, M. C. (2017). Sustratos como Material de Última Generación. OmniaScience Monographs.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2019). Elements of the Nature and Properties of Soils. Pearson.
- Weiler, S., & Scholz-Barth, K. (2009). Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design, and Construction of Landscapes over Structure. John Wiley & Sons.
- 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. DOI: [10.3390/s19235272](https://doi.org/10.3390/s19235272)



Anexo A. Código para el Funcionamiento del Dispositivo Electrónico

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>

#define SENSOR A0
int Humedad;

#define CSpin 53

RTC_DS3231 rtc;

File archivo;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  rtc.begin();
  //rtc.adjust(DateTime(2024,05,07,20,00,00));

  Serial.println("Inicializando tarjeta ...");
  if (!SD.begin(CSpin)) {
    Serial.println("Fallo en la inicialización !");
    return;
  }
  Serial.println("inicialización correcta");
}

void loop() {
  Humedad = analogRead(A0);
  DateTime now = rtc.now();

  Serial.print(now.day());
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.month());
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.year());
  Serial.print(",");
  Serial.print(now.hour());
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.minute());
```



```
Serial.print(':');  
Serial.print(now.second());  
Serial.print(",");  
Serial.print(Humedad);  
Serial.println();  
  
archivo = SD.open("Prueba.txt", FILE_WRITE);  
if (archivo) {  
  
    archivo.print(now.day());  
    archivo.print('/');  
    archivo.print(now.month());  
    archivo.print('/');  
    archivo.print(now.year());  
    archivo.print(",");  
    archivo.print(now.hour());  
    archivo.print(':');  
    archivo.print(now.minute());  
    archivo.print(':');  
    archivo.print(now.second());  
    archivo.print(",");  
    archivo.print(Humedad);  
    archivo.println();  
  
    archivo.close();  
}  
else {  
    Serial.println("Error de apertura de Prueba.txt");  
}  
delay(60000);  
}
```



Anexo B. Código de Calibración con Modelo Integrador

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#define SENSOR A0
int sensor; int SenMax = 597;
float Porosidad = 49.55, DensidadAparente = 0.96;
float a0 = -1038.8152, a1 = 16.25297, a2 = 245.83371, a3 = 0.5527;
float b0 = 85.36801, b1 = -1.35923, b2 = -12.72041, b3 = -0.01437;
float c0 = 0.30342, c1 = -0.00515, c2 = -0.03263, c3 = -6.53742E-06;
float suma = 0;
float Const_a = 0, Const_b = 0, Const_c = 0, Humedad;
#define CSpin 53
RTC_DS3231 rtc;
File archivo;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  rtc.begin();
  //rtc.adjust(DateTime(2024,05,07,20,00,00));

  Serial.println("Inicializando tarjeta ...");
  if (!SD.begin(CSpin)) {
    Serial.println("Fallo en la inicialización !");
    return;
  }
  Serial.println("inicialización correcta");
}

void loop() {
  sensor = (SenMax - analogRead(A0));
  DateTime now = rtc.now();
  Const_a = (a0 + a1*Porosidad + a2*DensidadAparente +
a3*(Porosidad/DensidadAparente));
  Const_b = (b0 + b1*Porosidad + b2*DensidadAparente +
b3*(Porosidad/DensidadAparente));
  Const_c = (c0 + c1*Porosidad + c2*DensidadAparente +
c3*(Porosidad/DensidadAparente));
  Humedad = Const_a*(exp(-Const_b*exp(-Const_c*sensor)));

  Serial.print(now.day());
  Serial.print('/');
```



```
Serial.print(now.month());  
Serial.print('/');  
Serial.print(now.year());  
Serial.print(",");  
Serial.print(now.hour());  
Serial.print(':');  
Serial.print(now.minute());  
Serial.print(':');  
Serial.print(now.second());  
Serial.print(",");  
Serial.print(sensor);  
Serial.print(",");  
Serial.print("Humedad: ");  
Serial.print(Humedad, 4);  
Serial.println("%");  
  
archivo = SD.open("Prueba.txt", FILE_WRITE);  
if (archivo) {  
  archivo.print(now.day());  
  archivo.print('/');  
  archivo.print(now.month());  
  archivo.print('/');  
  archivo.print(now.year());  
  archivo.print(",");  
  archivo.print(now.hour());  
  archivo.print(':');  
  archivo.print(now.minute());  
  archivo.print(':');  
  archivo.print(now.second());  
  archivo.print(",");  
  archivo.print(sensor);  
  archivo.print(",");  
  archivo.print("Humedad: ");  
  archivo.print(Humedad, 4);  
  archivo.println("%");  
  archivo.close();  
}  
else {  
  Serial.println("Error de apertura de Prueba.txt");  
}  
delay(60000);  
}
```

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la Tesis	DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL REGISTRO DE HUMEDAD EN MATRICES SÓLIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL
Autor (a) o Autores (ras) de la Tesis	Joel Hernández Hernández
ORCID:	https://orcid.org/0009-0001-6027-2185
Resumen de la Tesis	<p>La humedad del suelo es un parámetro esencial para el estudio de los suelos y la agricultura. Se han desarrollado diversos métodos para determinarla, aunque estos suelen ser costosos y laboriosos. En este sentido, el avance de la electrónica ha permitido el desarrollo de la aplicación de sensores de bajo costo con potencial de aplicación para diferentes áreas de investigación. En este trabajo se propuso un dispositivo electrónico controlado mediante la tarjeta Arduino Mega 2560 y un sensor capacitivo (<i>Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0</i>) para determinar la humedad del suelo. El objetivo principal fue calibrar el dispositivo en matrices sólidas de interés ambiental, donde se usaron diferentes clases texturales: suelo limoso, suelo franco arenoso, suelo arcilloso y sustrato a base de lirio acuático con agrolita. Así también, se buscó determinar la influencia de los parámetros de calidad del agua (pH, Temperatura, Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales) sobre el sensor.</p> <p>La calibración se realizó a través de modelos lineales, modelos polinomiales de segundo orden y el modelo de Gompertz. Donde el modelo de Gompertz se empleó para generar un modelo integrador que permitiera calcular las curvas de calibración de cada matriz sólida a través de parámetros físicos fácilmente medibles de las matrices sólidas. El dispositivo mostró resultados aceptables en la calibración con los tres modelos con R^2 superiores a 0.95. En este estudio, la influencia de la calidad del agua en la estimación de la humedad fue moderada mientras que los parámetros de la matriz sólida fueron notablemente significativos.</p>
Palabras claves de la Tesis	Sensor capacitivo, Arduino, Humedad de suelo, software libre.

Referencias Citadas

- Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. *Sensors*, 20(2), 363. DOI:10.3390/s20020363
- Al-Obaidi, M. A. M., Radhi, M. A. H., Ibrahim, R. S., & Sutikno, T. (2020). Technique Smart Control Soil Moisture System to Watering Plant Based on IoT with Arduino Uno. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(5), 2038-2044. DOI: 10.11591/eei.v9i5.1896
- Aranda, D., Tapia, A., & Millan, P. (2022). Calibración y Caracterización de Sensores Capacitivos de Bajo Coste para la Monitorización de Humedad de Suelo. En *XLIII Jornadas de Automática: Libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja) (2022a ed., pp. 479–485)*. Servicio de Publicacións da UDC. DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0479
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2021). *Getting Started with Arduino: The Open-Source Electronics Prototyping Platform*. Maker Media.
- Barrigüete, J. L. A. (2007). *Externalidades de Red en la Economía Digital: Introducción a la Modelización de Mercados de Redes Mediante la Teoría de Sistemas Dinámicos*. Marcial Pons.
- Bertoletti, P. (2019). *Proyectos con ESP32 y LoRa*. Editora BCN.
- Brum, M. L., Rodrigues, P. E. C., Martins, J. D., & Swarowsky, A. (2024). New insights on measuring soil water content in arduino plataform. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3777467/v1
- Chereches, I. A., Gaspar, F., & Danci, I. A. (2024). Designing and Calibration of a Low-Cost Multi-Point Soil Moisture Monitoring System for Precision Agriculture. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 245-254. DOI: 10.35633/inmateh-72-23
- de Oliveira, S. (2021). *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi 2a edição: Atualizado para ESP32*. Novatec Editora.
- Dembowski, K. (2013). *Raspberry Pi – das Handbuch*. Springer.
- Duarte, T. F., da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Koetz, M. (2021). Using Arduino Sensors to Monitor Vacuum Gauge and Soil Water Moisture. *Dyna-Columbia*, 88(219), 190-196. DOI: 10.15446/dyna.v88n219.94121
- Fares, A., Awal, R., & Bayabil, H. K. (2016). Soil Water Content Sensor Response to Organic Matter

<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.2; transform: rotate(-45deg);">Universidad Juárez del Estado de Durango</p>	<p>Content under Laboratory Conditions. <i>Sensors</i>, 16(8), 1239. DOI: 10.3390/s16081239</p> <p>García Pérez, A. (2008). <i>Estadística Aplicada: Conceptos Básicos</i>. UNED.</p> <p>González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo-Moreo, A. B., Jiménez-Buendía, M., & Soto-Valles, F. (2019). Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor. <i>Sensors</i>, 19(3), 491. DOI: 10.3390/s19030491</p> <p>Hamoodi, S. A., Hamoodi, A. N., & MHaydar, G.M. (2020). Automated Irrigation System Based on Soil Moisture Using Arduino Board. <i>Bulletin of Electrical Engineering and Informatics</i>, 9(3), 870-876. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1736</p> <p>Hrisko, J. (2020). Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing. Technical Report. DOI: 10.13140/RG.2.2.36214.83522</p> <p>López Aldea, E. (2016). <i>Arduino. Guía Práctica de Fundamentos y Simulación</i>. RA-MA Editorial.</p> <p>Lugo Espinosa, O., Villavicencio Pérez, G. A. & Díaz Luna, S. A. (2014). Paquete Tecnológico para el Monitoreo Ambiental en Invernaderos con el Uso de Hardware y Software Libre. <i>Terra Latinoamericana</i>, 32(1), 77-84.</p> <p>Majer, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. 2017 Internet Technologies and Applications (ITA). DOI: 10.1109/itecha.2017.8101926</p> <p>McCarty, L. B., Hubbard, L. R., & Quisenberry, V. L. (2016). <i>Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies</i>. Springer.</p> <p>Minervini, M. G., Morrás, H. J. M., & Taboada, M. Á. (2018). Efectos del Fuego en la Matriz del Suelo. Consecuencias sobre las Propiedades Físicas y Mineralógicas. <i>Ecología Austral</i>, 28(1), 012-027. DOI: 10.25260/ea.18.28.1.0.127</p> <p>Misra, Y. (2021). <i>Programming and Interfacing with Arduino</i>. CRC Press.</p> <p>Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System. <i>Agriculture</i>, 9(7), 141. DOI: 10.3390/agriculture9070141</p> <p>Navarrete, Ó. A., Quechol, G. T., & Herrera, G. G. (2011). Software Propietario vs Software Libre: Una Evaluación de Sistemas Integrales para la Automatización de Bibliotecas. <i>Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología e</i></p>
--	--

<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.1; transform: rotate(-45deg);">Universidad Juárez del Estado de Durango</p>	<p>Información, 25(54), 37. DOI: 10.22201/iibi.0187358xp.2011.54.27480</p> <p>Okasha, A. M., Ibrahim, H. G., Elmetwalli, A. H., Khedher, K. M., Yaseen, Z. M., & Elsayed, S. (2021). Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management. <i>Sensors</i>, 21(16), 5387. DOI: 10.3390/s21165387</p> <p>Oladipo, I. O., & Ajewole, P. O. (2024). A Smart Irrigation Water Application System Based on Arduino Platform. <i>Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research</i>, 11(2), 132- 140. DOI: 10.9734/ajahr/2024/v11i2320</p> <p>Osman, K. T. (2013). <i>Soils: Principles, Properties and Management</i>. Springer.</p> <p>Parihar, Y. S. (2019). Internet of Things and Nodemcu. <i>Journal of Eemerging Technologies and Innovative Research</i>, 6(6), 1085.</p> <p>Parvin, N., & Degré, A. (2016). Soil-Specific Calibration of Capacitance Sensors Considering Clay Content and Bulk Density. <i>Soil Research</i>, 54(1), 111. DOI: 10.1071/sr15036</p> <p>Pearce, J. M. (2013). <i>Open-Source lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs</i>. Elsevier</p> <p>Pereira, R. M., Sandri, D., & Silva Júnior, J. J. D. (2022). Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the Cerrado, Brazil. <i>Revista Engenharia na Agricultura - REVENG</i>, 30, 262–272. DOI: 10.13083/reveng.v30i1.14017</p> <p>Picado Mora, E., Araya Quesada, D., Ruiz Granados, N., & Sibaja Granados, J. (2024). Emisión de Datos del Sensor de Humedad “EDANA” para la utilización en diferentes labores Agrícolas. <i>Investiga.TEC</i>, 17(50), 10–15. DOI: 10.18845/itec.v17i50.7160</p> <p>Pire, R. R., & Pereira, A. (2003). Propiedades Físicas de Componentes de Sustratos de Uso Común en la Horticultura del Estado Lara, Venezuela. <i>Propuesta Metodológica. Bioagro</i>, 15(1), 55-64.</p> <p>Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of LowCost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. <i>Sensors</i>, 20(12), 3585. DOI: 10.3390/s20123585</p> <p>Qin, F., & Dai, X. (2013). <i>Rapid BeagleBoard Prototyping with MATLAB and Simulink</i>. Packt Pub Limited.</p> <p>Quesada Roldán, G. (2015). Producción de Chile Dulce en Invernadero Bajo Diferentes Niveles de Agotamiento en la Humedad del Sustrato. <i>Agronomía Costarricense</i>. DOI: 10.15517/rac.v39i1.19542</p>
--	--

<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.2; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Juárez MetroAgriFor </p>	<p>Radi, Murtiningrum, Ngadisih, Muzdrikah, F. S., Nuha, M. S., & Rizqi, F. A. (2018). Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193). 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST), 1–6. DOI: 10.1109/ICSTC.2018.8528624</p> <p>Rivas-Sánchez, Y. A., Moreno-Pérez, M. F., & Cañas, J. R. (2019). Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls. <i>Sustainability</i>, 11(3), 782. DOI: 10.3390/su11030782</p> <p>Sánchez, E., Ruiloba, P. R. P., Morales, L. M. L., & Erick, E. (2019). Calibración de Sensor de Humedad Aplicado a Sustrato de Fibra de Coco Comercial Comandado por Programación en ARDUINO. <i>Revista de Iniciación Científica</i>, 5, 92-99. DOI: 10.33412/rev-ric.v5.0.2392</p> <p>Sánchez, P. A. (2019). <i>Properties and Management of Soils in the Tropics</i>. Cambridge University Press.</p> <p>Schmidt, M. (2012). <i>Raspberry Pi: A Quick-start Guide</i>.</p> <p>Schwamback, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy. <i>Sensors</i>, 23(5), 2451. DOI: 10.3390/s23052451</p> <p>Sharma, P. K., & Kumar, S. (2023). <i>Soil Physical Environment and Plant Growth: Evaluation and Management</i>. Springer.</p> <p>Shukla, M. K. (2023). <i>Soil Physics: An Introduction, Second Edition (2a ed.)</i>. CRC Press.</p> <p>Souza, G., De Faria, B. T., Gomes Alves, R., Lima, F., Aquino, P. T., & Soininen, J.-P. (2020). Calibration Equation and Field Test of a Capacitive Soil Moisture Sensor. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), 180– 184. DOI: 10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277634</p> <p>Susha Lekshimi S. U., Singh D. N. & Shojaei Baghini M. (2014). A Critical Review of Soil Moisture Measurement. <i>Measurement</i>, 54, 92-105. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.007</p> <p>Terzic, E., Terzic, J., Nagarajah, R., & Alamgir, M. (2012). <i>A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments</i>. Springer.</p> <p>Villegas Torres, O. G., Domínguez Patiño, M. L., Albavera Pérez, M., Andrade Rodríguez, M., Sotelo Nava, H., Martínez Rangel, M. G., Aguilar Cortés, M., Castillo Carpintero, C., & Magadan Salazar, M. C. (2017). Sustratos como Material de Última Generación. <i>OmniaScience Monographs</i>.</p>
--	--

	<p>Weil, R. R., & Brady, N. C. (2019). Elements of the Nature and Properties of Soils. Pearson.</p> <p>Weiler, S., & Scholz-Barth, K. (2009). Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design, and Construction of Landscapes over Structure. John Wiley & Sons.</p> <p>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. <i>Sensors</i>, 19(23), 5272. DOI: 10.3390/s19235272</p>
--	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.