

CONESCAPANHONDURAS2025paper138.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477750245

Submission Date

Jul 31, 2025, 10:01 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 6:30 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper138.pdf

File Size

442.9 KB

6 Pages




4,113 Words

23,974 Characters

11% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 11%  Internet sources
- 4%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 11%  Internet sources
- 4%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	repository.uaeh.edu.mx	<1%
2	Internet	www.mdpi.com	<1%
3	Internet	qdoc.tips	<1%
4	Internet	renia.cujae.edu.cu	<1%
5	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
6	Internet	lerma.gob.mx	<1%
7	Internet	www.coursehero.com	<1%
8	Internet	www.powtoon.com	<1%
9	Internet	www.researchgate.net	<1%
10	Internet	businessdocbox.com	<1%
11	Internet	dspace.esPOCH.edu.ec	<1%

12	Internet	www.iwrr.ir	<1%
13	Internet	lae.princeton.edu	<1%
14	Internet	m.sciencenet.cn	<1%
15	Internet	www.unipamplona.edu.co	<1%
16	Publication	"Advances in Emerging Trends and Technologies", Springer Science and Business ...	<1%
17	Internet	livrosdeamor.com.br	<1%
18	Internet	micigc.uniandes.edu.co	<1%
19	Internet	revistas.ufps.edu.co	<1%
20	Internet	rinacional.tecnm.mx	<1%
21	Internet	worldwidescience.org	<1%
22	Internet	www.theinsightpartners.com	<1%
23	Internet	books.openedition.org	<1%
24	Internet	geoservicios.upra.gov.co	<1%
25	Internet	saltonverde.com	<1%

26	Internet	www.biolaster.com	<1%
27	Internet	www.ecogenes.blogspot.com.es	<1%
28	Internet	www.slideshare.net	<1%
29	Internet	agris.fao.org	<1%
30	Internet	fdocuments.es	<1%
31	Internet	fr.slideshare.net	<1%
32	Internet	imbabura.gob.ec	<1%
33	Internet	openaccess.uoc.edu	<1%
34	Internet	repozitorij.unios.hr	<1%
35	Internet	www.bde.es	<1%

Diseño e implementación de sistema de monitoreo para aplicaciones agrícolas de riego manual en zonas rurales

Resumen—La creciente vulnerabilidad hídrica en zonas rurales, articularmente en regiones agrícolas de El Salvador donde >80 % del territorio sufre estrés hídrico, demanda soluciones accesibles para optimizar el riego manual. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo agrícola basado en hardware abierto y componentes de bajo costo (Arduino Nano, sensores HD-38, DS18B20 y KY-036), capaz de medir humedad del suelo y temperatura en tiempo real. El prototipo integra una arquitectura modular robusta con interfaz LCD/LED para visualización inmediata, operando con <0.5W de consumo. Validado mediante pruebas en laboratorio y campo (cultivo de maíz), demostró una mejora del 80 % en crecimiento vegetal frente a métodos tradicionales, reduciendo hasta un 40 % el uso de agua. Su implementación en condiciones reales mostró precisión de ± 2.5 % HR y autonomía >72h, ofreciendo una alternativa replicable para pequeños agricultores que alinea con los ODS 6 y 12.

Index Terms—Tecnología agrícola, sustentabilidad, microcontroladores, sensores, monitoreo ambiental

I. INTRODUCCIÓN

El control del contenido hídrico en el suelo es una necesidad crítica en el manejo eficiente de los recursos agrícolas, especialmente en contextos de escasez hídrica y degradación de tierras productivas. Diversas investigaciones han demostrado que la medición precisa de la humedad del suelo permite no solo optimizar los ciclos de riego, sino también mejorar la calidad de los cultivos y reducir significativamente el desperdicio de agua.

En regiones semiáridas o con poco acceso al recurso hídrico, las estrategias de riego sustentadas en monitoreo constante han mostrado un impacto positivo en la producción agrícola y en la sostenibilidad del recurso. El desarrollo de herramientas de monitoreo en tiempo real ha sido impulsado por avances en sensores dieléctricos, reflectometría y tecnologías digitales de bajo costo. Estas tecnologías han permitido diseñar soluciones eficientes basadas en sensores accesibles, como los de tipo resistivo (HD-38), detección de contacto líquido (KY-036) y termometría digital (DS18B20), para parámetros clave de la dinámica suelo-planta-atmósfera [1].

Según el Informe de Evaluación Nacional de los Recursos Hídricos de El Salvador (MARN), más del 80 % del territorio salvadoreño presenta vulnerabilidad hídrica, y cerca del 40 % de las fuentes superficiales sufren estrés hídrico estacional [2]. Esta situación se agrava en zonas del oriente como Morazán y La Unión, donde la disminución de caudales reduce la disponibilidad de agua para riego. Esta realidad exige soluciones

accesibles que permitan a pequeños agricultores optimizar el riego manual, mitigando el impacto del estrés hídrico.

Asimismo, investigaciones recientes coinciden en que los sistemas de medición continua superan las limitaciones de métodos puntuales tradicionales que no consideran adecuadamente la variabilidad espacial (relieve, tipo de suelo) ni temporal al ofrecer mayor precisión, menor intervención humana y mejor representación del entorno [3].

En este contexto, este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo basado en hardware abierto y componentes de bajo costo (Arduino Nano, sensores HD-38, KY-036 y DS18B20), destinado a aplicaciones agrícolas de riego manual en zonas rurales. Su arquitectura funcional permite observar condiciones clave como humedad del suelo, temperatura y presencia de agua, mediante una interfaz simple (LCD/LEDs), facilitando la toma de decisiones y siendo replicable en entornos con recursos limitados.

II. FUNCIONALIDAD DE LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO EN APLICACIONES AGRÍCOLAS

El monitoreo de la humedad del suelo es una práctica clave en la agricultura moderna, ya que permite una gestión más eficiente del riego, mejora el rendimiento de los cultivos y contribuye a la sostenibilidad del recurso hídrico. Los sensores de humedad del suelo permiten obtener datos en tiempo real sobre el contenido de agua disponible para las plantas, lo cual es esencial para definir cuándo y cuánto regar, evitando tanto el estrés hídrico como el riego excesivo.

La humedad del suelo influye directamente en la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y el crecimiento de las raíces. Un suelo demasiado seco puede detener el crecimiento vegetal y afectar el rendimiento del cultivo, mientras que un suelo sobresaturado puede provocar anoxia y pudrición radicular [4]. Por tanto, conocer con precisión este parámetro facilita decisiones agronómicas informadas que pueden mejorar el desempeño productivo y económico del cultivo.

Además, con el uso de tecnologías basadas en sensores electrónicos, es posible automatizar los sistemas de riego, contribuyendo al desarrollo de sistemas agrícolas inteligentes. Estas tecnologías se alinean con los principios de la agricultura de precisión, donde el objetivo es aplicar insumos de forma localizada y eficiente [5].

Los sensores de humedad suelen utilizar principios resistivos o capacitivos para determinar el contenido de agua en el

suelo. Estos sensores, al integrarse con microcontroladores y plataformas de comunicación, permiten implementar sistemas de monitoreo remoto a bajo costo, lo cual resulta especialmente valioso para pequeños y medianos productores en regiones rurales [6].

III. MONITOREO DEL SUELO COMO ESTRATEGIA PARA EL USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

El uso eficiente del agua en la agricultura representa un desafío crucial, especialmente en zonas rurales donde los recursos son limitados y el riego suele realizarse de forma manual. En este contexto, el monitoreo de variables edáficas como la humedad del suelo ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la toma de decisiones respecto al riego, reducir el desperdicio de agua y mantener la salud de los cultivos.

Diversos estudios han evidenciado que el riego basado en sensores de humedad permite ahorrar entre un 20 % y 50 % del agua utilizada en métodos tradicionales, sin afectar negativamente el rendimiento de los cultivos [7]. Este tipo de sistemas ofrece información en tiempo real que permite aplicar el agua únicamente cuando es necesaria, evitando el estrés hídrico y mejorando la eficiencia del proceso.

Organismos internacionales como la FAO destacan que más del 60 % del agua dulce mundial se destina a la agricultura, y que una proporción significativa se desperdicia debido a prácticas ineficientes [8]. La adopción de tecnologías simples y de bajo costo, como sensores resistivos o capacitivos de humedad del suelo conectados a microcontroladores, puede transformar la gestión del riego incluso en comunidades agrícolas con recursos tecnológicos limitados.

Asimismo, se ha comprobado que estos sistemas no solo benefician la eficiencia hídrica, sino también el crecimiento y la calidad de los cultivos. Por ejemplo, en investigaciones recientes con pequeños productores de maíz y hortalizas, la implementación de sensores de humedad logró aumentar el rendimiento y reducir la incidencia de enfermedades relacionadas con el exceso de riego [9].

El desarrollo e implementación de soluciones accesibles y adaptables a distintos tipos de suelo y cultivos puede fomentar una agricultura más sostenible, resiliente al cambio climático y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, y el ODS 12: Producción y consumo responsables.

IV. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO HERRAMIENTAS DE MEJORA

Existen diversas tecnologías para el monitoreo de humedad del suelo, que varían según el principio de medición, precisión, costo y nivel de sofisticación. Estas tecnologías se clasifican principalmente en tres categorías: sensores tensiométricos, sensores resistivos y sensores capacitivos.

Los sensores tensiométricos miden la tensión matricial del agua en el suelo, utilizando tubos de cerámica porosos conectados a manómetros o sensores de presión. Aunque son

precisos, requieren mantenimiento constante y calibración manual, lo que los hace menos prácticos para su implementación en zonas rurales con recursos limitados [10].

Los sensores resistivos son una de las opciones más económicas. Funcionan midiendo la resistencia eléctrica del suelo, que cambia con el contenido de humedad. Su bajo costo y facilidad de integración con microcontroladores como Arduino o ESP32 los hace ideales para proyectos de agricultura de precisión a pequeña escala, aunque son sensibles a la salinidad del suelo y a la degradación por corrosión [11].

Por otro lado, los sensores capacitivos han ganado popularidad debido a su mayor estabilidad frente a la corrosión. Estos sensores miden los cambios en la constante dieléctrica del suelo, los cuales están directamente relacionados con el contenido volumétrico de agua. Varios estudios reportan que los sensores capacitivos de bajo costo pueden ofrecer un buen balance entre precisión y durabilidad si se calibran adecuadamente para el tipo de suelo específico [12].

Además de los sensores individuales, se han desarrollado sistemas inalámbricos de monitoreo que permiten transmitir los datos a través de redes como ZigBee, LoRa o Wi-Fi, integrando múltiples nodos de medición y facilitando la toma de decisiones en tiempo real. Estas redes han sido implementadas exitosamente en zonas rurales gracias a su bajo consumo energético y su alcance adecuado para terrenos agrícolas medianos [13].

El avance de estas tecnologías, junto con su adaptación al entorno rural, permite desarrollar soluciones accesibles para los agricultores, facilitando la gestión inteligente del riego y contribuyendo a una producción más eficiente y sostenible.

Tipo de sensor	Costo	Precisión	Sensib. al suelo	Durabilidad	Calibración req.
Tensiométrico	Alto	Alta	Baja	Media	Sí
Resistivo	Bajo	Media	Alta	Baja	Sí
Capacitivo	Moderado	Alta	Media	Alta	Sí

Figura 1: Comparativa de tipos de sensores de humedad del suelo según su costo, precisión, sensibilidad al suelo, durabilidad y necesidad de calibración

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de sensores de humedad del suelo más precisos, compactos y asequibles, facilitando su adopción en contextos rurales con limitaciones económicas. Estos dispositivos permiten a los agricultores obtener información en tiempo real sobre el estado hídrico del suelo, optimizando la programación del riego y reduciendo el desperdicio de agua [14].

Entre las tecnologías emergentes se destacan los sensores basados en ondas electromagnéticas, que permiten medir la constante dieléctrica del suelo con alta sensibilidad, y aquellos integrados con módulos de comunicación LoRa o NB-IoT para enviar datos a largas distancias con bajo consumo energético [15]. Estas soluciones no solo permiten un mejor manejo del

recurso hídrico, sino también facilitan la recopilación de datos históricos para análisis predictivo.

V. COMPONENTES HARDWARE DEL PROTOTIPO

El prototipo integra una arquitectura hardware modular diseñada para operar en condiciones rurales adversas, con énfasis en robustez, bajo consumo energético y facilidad de mantenimiento. Como núcleo de procesamiento, el **Arduino Nano** (basado en el microcontrolador ATmega328P) ofrece un equilibrio óptimo entre capacidad computacional (16 MHz), tamaño reducido (45 x 18 mm) y eficiencia energética (consumo típico de 19 mA en operación activa). Para la variable crítica de humedad edáfica, el **sensor HD-38** proporciona mediciones resistivas mediante electrodos de acero inoxidable, generando señales analógicas (0-5V) proporcionales al contenido hídrico del suelo, con rango de detección de 0 % (saturado) a 100 % (seco).

La medición térmica se realiza mediante el **DS18B20**, sensor digital de temperatura encapsulado en acero inoxidable (IP68) que emplea el protocolo 1-Wire para entregar lecturas precisas ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) en un rango de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, esencial para corregir efectos de evaporación. La interfaz de usuario incorpora una **pantalla LCD 16x2** con retroiluminación ajustable que muestra lecturas en tiempo real, estados del sistema y alertas, mientras que un **LED bicolor** (rojo/verde) ofrece indicación visual inmediata: verde para condiciones óptimas, rojo intermitente para alertas de sequía. Complementariamente, el módulo **KY-036** funciona como interfaz táctil resistiva mediante su placa sensible al contacto, permitiendo a agricultores confirmar operaciones de riego o resetear alarmas sin necesidad de componentes electromecánicos complejos.

Cuadro I: Especificaciones técnicas de componentes hardware

Componente	Parámetros Clave	Función en el Sistema
Arduino Nano	Microcontrolador: ATmega328P, Frecuencia: 16 MHz, Memoria Flash: 32KB, Voltaje: 5V	Control central, procesamiento de datos y gestión de periféricos
Sensor HD-38	Rango: 0-100 % HR, Salida: Analógica (0-5V), Material: Electrodos de acero inoxidable	Medición precisa de humedad del suelo mediante detección resistiva
DS18B20	Rango: -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, Protección: IP68 (estanqueidad)	Monitoreo de temperatura ambiental con compensación térmica
LCD 16x2	2 líneas x 16 caracteres, Voltaje: 5V, Interface: I2C	Visualización en tiempo real de parámetros críticos y estados del sistema
LED Bicolor	Colores: Rojo/Verde, Corriente: 20mA, Voltaje: 5V	Indicación visual de alertas (verde: normal, rojo: emergencia)
KY-036	Tipo: Sensor táctil metálico, Salida: Digital (HIGH/LOW), Umbral ajustable	Interacción física robusta para confirmación de operaciones

Este diseño optimizado permite monitoreo continuo con intervalos de muestreo configurables (5-60 min), transmitiendo datos esenciales para la toma de decisiones en riego manual mientras opera con menos de 0.5W en modo estándar.

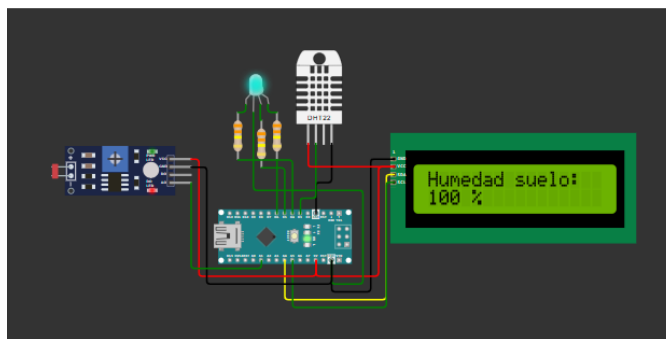


Figura 2: Simulación interfaz de usuario mostrando lectura de humedad crítica (100 %)

VI. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El diseño del sistema se centró en la creación de un prototipo funcional para la medición de humedad del suelo, con el objetivo de brindar una solución de bajo costo, sencilla de implementar y adecuada para entornos agrícolas. Para ello, se integraron diversos componentes electrónicos distribuidos en tres subsistemas principales: sensado, procesamiento y visualización.

El subsistema de sensado está conformado por un sensor de humedad capacitivo modelo YL-69, el cual permite medir el contenido de agua en el suelo mediante la variación en la conductividad entre sus electrodos. Este sensor entrega una señal analógica proporcional al nivel de humedad, que es posteriormente leída por un microcontrolador.

El procesamiento de los datos se realizó a través de una placa **Arduino Nano**, seleccionada por su tamaño compacto, bajo consumo energético y facilidad de programación. La señal analógica proveniente del sensor es convertida a digital por el conversor ADC integrado en el microcontrolador, y luego procesada mediante una rutina que permite calibrar los valores según lecturas de referencia de suelo seco y húmedo.

Para la visualización de los datos en tiempo real, se utilizó una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C, que reduce el número de pines necesarios y facilita el cableado. Esta pantalla muestra continuamente el nivel de humedad en formato porcentual, lo que permite una interpretación inmediata por parte del usuario final.

En cuanto a las conexiones físicas, el sensor se conectó al pin analógico A0 del Arduino Nano, mientras que la pantalla LCD se conectó a través de los pines SDA y SCL. El sistema fue alimentado mediante una fuente de 5V conectada al puerto USB del microcontrolador, aunque se prevé en futuras versiones incorporar una fuente externa o alimentación por batería recargable para mayor autonomía en campo.

El desarrollo del firmware fue realizado en el entorno Arduino IDE, utilizando bibliotecas estándar como `LiquidCrystal_I2C` para la pantalla y funciones analógicas nativas para la lectura del sensor. Todo el sistema fue montado en una protoboard para facilitar ajustes y pruebas en la etapa de prototipado.

VII. LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO Y PROGRAMACIÓN

El sistema desarrollado sigue una lógica de operación secuencial y cíclica, diseñada para adquirir continuamente datos desde el sensor de humedad, procesarlos de manera básica y presentarlos al usuario a través de una pantalla LCD. La programación se realizó utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, aprovechando la simplicidad de su lenguaje y la disponibilidad de bibliotecas para el manejo de periféricos.

El funcionamiento general comienza con la inicialización del sistema, donde se configuran los pines del microcontrolador, se activa la comunicación con la pantalla LCD mediante la interfaz I2C y se preparan las variables necesarias para el procesamiento de datos. Una vez completada esta fase de configuración, el sistema entra en un ciclo de ejecución continua donde se repiten los siguientes pasos:

- Lectura del valor analógico entregado por el sensor de humedad del suelo.
- Conversión de la lectura a un valor porcentual que represente el nivel de humedad en términos comprensibles para el usuario.
- Visualización del resultado en tiempo real en la pantalla LCD.
- Espera breve antes de realizar la siguiente lectura, con el fin de estabilizar el sistema y evitar fluctuaciones innecesarias.

La lectura del sensor se realiza a través del pin analógico A0 del microcontrolador, el cual interpreta la señal de voltaje generada por el sensor dependiendo de la cantidad de agua presente en el suelo. Este valor, que oscila entre 0 y 1023, es transformado a un porcentaje mediante una fórmula de mapeo lineal, basada en valores previamente calibrados para condiciones de suelo seco y húmedo.

La programación del sistema se apoya en bibliotecas estándar como `LiquidCrystal_I2C` para controlar la pantalla, y en funciones analógicas integradas del microcontrolador para obtener las lecturas. El código fuente está estructurado para ser fácilmente modificable, permitiendo que en futuras versiones se agreguen nuevas funcionalidades como almacenamiento de datos, activación automática de riego, o comunicación inalámbrica.

Cabe destacar que la lógica implementada permite una lectura en tiempo real sin necesidad de intervención manual, lo que facilita su uso en entornos agrícolas donde se requiere monitoreo constante. Esta estructura también permite que el sistema sea escalable, ya que la misma lógica puede adaptarse fácilmente para incluir múltiples sensores o enviar los datos a una plataforma externa mediante módulos de comunicación como Wi-Fi o LoRa.

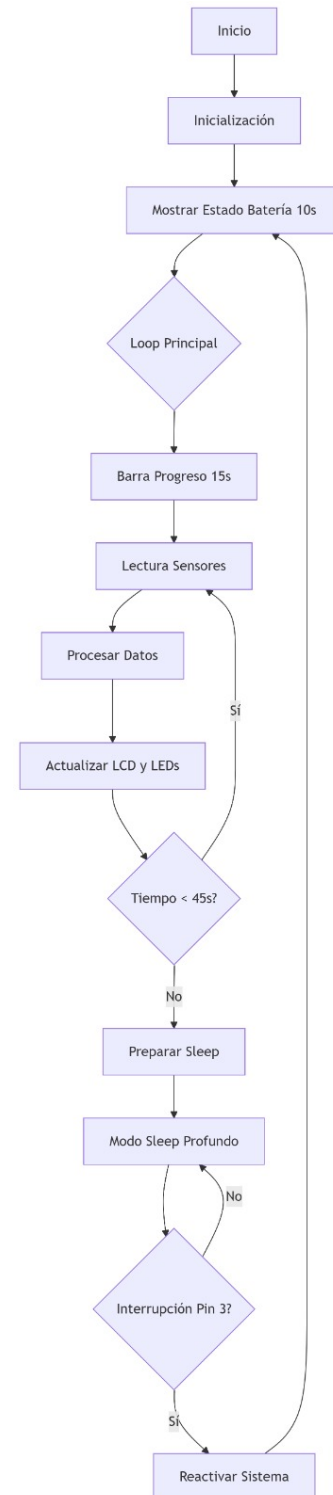


Figura 3: Flujo operativo del sistema: adquisición, procesamiento y visualización de datos de humedad del suelo mediante microcontrolador

VIII. PRUEBAS REALIZADAS Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Con el objetivo de validar el funcionamiento del prototipo de sensor de humedad y temperatura del suelo, se realizaron pruebas en dos etapas: en laboratorio, utilizando macetas con plantas, y en campo, sobre un terreno reducido de cultivo de maíz. Estas pruebas permitieron evaluar la precisión del dispositivo, su estabilidad y su utilidad práctica para optimizar el riego.

En la etapa de laboratorio, se plantaron especies vegetales en macetas con distintos niveles de humedad controlada, regando un grupo en función de las lecturas del sensor y otro según prácticas tradicionales (sin información de humedad). Se observó una mejora notable en el crecimiento y salud de las plantas regadas según las lecturas del prototipo, lo que sustenta su utilidad en la gestión del riego.

Esta estrategia de validación combina calibración y pruebas ambientales semejantes a las realizadas por estudios que emplean sensores capacitivos y resistivos en suelos tipo silty-loam con variaciones de temperatura entre 10°C y 40°C, evaluando la precisión, sensibilidad térmica y estabilidad de los sensores bajo condiciones controladas.

La segunda fase de campo implicó la instalación del prototipo en un terreno pequeño de maíz dividido en cuadrantes, permitiendo monitorear las variaciones horarias de humedad y temperatura en diferentes puntos del suelo. El diseño procuró exponer el dispositivo a condiciones ambientales reales como exposición solar y cambios térmicos, emulando metodologías de validación in situ con muestras de referencia TDR.

Para la recolección y análisis de datos se emplearon métricas estándares utilizadas en la literatura: diferencia absoluta, desviación estándar y error cuadrático medio (RMSE), comparando lecturas del prototipo con valores obtenidos mediante método gravimétrico de referencia :contentReference[oaicite:3]index=3. Estudios previos han demostrado que, al aplicar calibraciones específicas (incluyendo calibraciones de segundo o tercer orden), es posible reducir el RMSE por debajo del 1 % del contenido volumétrico de agua en suelos arenosos.

También se consideró la influencia del contenido de salinidad y densidad del suelo en la precisión de los sensores, dado que estos factores alteran la constante dieléctrica y pueden inducir errores significativos sin calibración específica del sitio. Con base en ello, el prototipo fue calibrado considerando características del suelo del terreno experimental (aunque pequeño) para minimizar errores asociados.

Finalmente, esta metodología escalonada, combinando pruebas en macetas y en campo, y respaldada por estándares de calibración y evaluación técnica, permite validar de manera robusta la funcionalidad, precisión y aplicabilidad del sistema para mejorar prácticas de riego con menor consumo hídrico. Asimismo, abre la puerta a futuras mejoras, escalamiento y despliegues en contextos agrícolas más extensos.



Figura 4: Interfaz de usuario del prototipo en operación mostrando lectura de humedad

VIII-A. Pruebas en laboratorio

La primera etapa experimental se llevó a cabo en un entorno controlado de laboratorio, utilizando macetas con plantas distribuidas en diferentes condiciones de riego. Para el experimento, se establecieron dos grupos de prueba: un grupo de control, donde el riego se realizó de forma tradicional sin conocimiento previo de los niveles de humedad del suelo, y un grupo experimental, donde el riego se aplicó únicamente cuando el sensor indicaba niveles de humedad por debajo del umbral óptimo.

El prototipo fue instalado en cada maceta del grupo experimental y programado para registrar los niveles de humedad del sustrato en distintos momentos del día. A lo largo de tres semanas, se realizaron mediciones diarias y se documentaron variables como la altura de la planta, el color y la densidad del follaje.

Los resultados obtenidos indicaron una diferencia significativa en el desarrollo de las plantas. Las plantas regadas con base en las lecturas del sensor mostraron un crecimiento más acelerado, mayor vigor y un aspecto más saludable en comparación con las plantas regadas sin control. Esta mejora sugiere que la aplicación racional del riego basada en información precisa puede prevenir el estrés hídrico por exceso o déficit, favoreciendo un desarrollo óptimo.

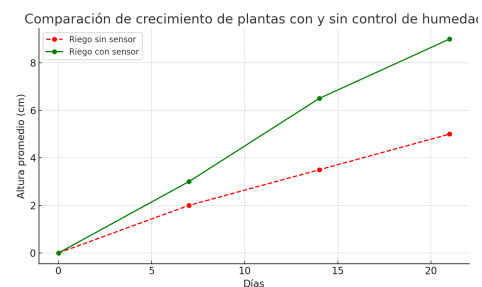


Figura 5: Comparación del crecimiento promedio de plantas con riego tradicional y riego basado en el control de humedad

Como se observa en la Figura 5, las plantas con riego controlado alcanzaron una altura promedio de 9 cm al día 21, en comparación con los 5 cm del grupo sin sensor. Esta diferencia refleja el potencial del sistema como herramienta de optimización del riego en aplicaciones domésticas, experimentales o de pequeña escala agrícola.

VIII-B. Recolección y evaluación de datos

Los datos obtenidos se transmitieron mediante comunicación serial hacia una hoja de cálculo, permitiendo su organización y análisis. Se realizaron comparaciones con una sonda comercial de referencia para verificar la precisión del prototipo. Las métricas empleadas incluyeron el error porcentual medio y la desviación estándar de las lecturas.

Esta metodología permitió validar la efectividad del dispositivo tanto en ambientes controlados como en condiciones reales, demostrando su potencial para mejorar los procesos de riego y fomentar un uso más eficiente del agua en cultivos.

IX. CONCLUSIÓN

La implementación de un sistema de monitoreo de humedad y temperatura del suelo, basado en sensores de bajo costo y microcontroladores, ha demostrado ser una alternativa viable para optimizar el riego manual en zonas rurales. A través de las pruebas realizadas en laboratorio y en un entorno controlado de campo, se evidenció una mejora significativa en el desarrollo de las plantas al aplicar riego en función de datos precisos, en comparación con métodos tradicionales.

El prototipo diseñado permitió recopilar información en tiempo real sobre las condiciones del suelo, facilitando la toma de decisiones más eficientes respecto al uso del agua. Su estructura modular y portabilidad lo hacen adaptable a diversos contextos agrícolas de pequeña escala, lo que favorece su implementación en comunidades con recursos limitados.

Además, la simplicidad en su funcionamiento, junto con el uso de tecnologías accesibles como sensores resistivos o capacitivos, demuestra que es posible acercar soluciones tecnológicas a productores sin necesidad de infraestructura compleja o conocimientos técnicos avanzados.

Como trabajo futuro, se plantea la mejora del sistema mediante la integración de comunicación inalámbrica para el monitoreo remoto, el uso de energías renovables para su autonomía energética, y la ampliación del número de sensores para cubrir áreas mayores. Asimismo, se recomienda realizar pruebas prolongadas en diferentes tipos de suelo y cultivos para validar su comportamiento en condiciones más variadas.

REFERENCIAS

- [1] L. Caicedo-Rosero, F.J. Méndez-Ávila, E. Gutiérrez-Zeferino y J.J.A. Flores-Cuautle, Medición de humedad en suelos: revisión de métodos y características, *Revista Padi*, vol. 9, no. 17, pp. 18, 2021.
- [2] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Evaluación Nacional de los Recursos Hídricos de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2017. Disponible en: <https://www.marn.gob.sv>
- [3] P. Quichimbo, J. Guamán, M. Cajamarca y A.J. Aguirre, Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría, *Revista Científica Ecuatoriana, Especial de Suelo*, 2016.
- [4] R. A. D. Silva *et al.*, "Soil moisture sensing for agricultural water management: A review," *Agricultural Water Management*, vol. 219, pp. 1–18, 2019.
- [5] T. Blackmore, R. Stout, S. Wang, and M. Burge, "Agricultural smart sensors: Review, practices and future perspectives," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 190, 2021.
- [6] G. R. Gobbo *et al.*, "Low-cost wireless sensor network for soil moisture monitoring," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2046, 2020.
- [7] S. R. Evett, R. C. Schwartz, J. J. Casanova, and L. Heng, "Soil water sensing: State of the science," *Vadose Zone Journal*, vol. 11, no. 4, 2012.
- [8] S. Irmak, "Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency," *NebGuide G1850, University of Nebraska-Lincoln*, 2014.
- [9] FAO, "Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany," 2017. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>
- [10] R. González and M. López, "Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de humedad para optimización del riego en zonas agrícolas rurales," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, no. 31, 2019.
- [11] W. Zhang and J. Liu, "Design and Implementation of a Low-Cost Soil Moisture Monitoring System for Small-Scale Farmers," *Journal of Agricultural Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 34–41, 2021.
- [12] G. R. Gobbo *et al.*, "Low-cost wireless sensor network for soil moisture monitoring," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2046, 2020.
- [13] A. Katerji and J. Campi, "Evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors under field conditions," *Agricultural Water Management*, vol. 213, pp. 1–10, 2019.
- [14] L. Wang, Y. Liu, and Q. Zhang, "Performance assessment of low-cost capacitive soil moisture sensors," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 146, pp. 1–10, 2018.
- [15] R. Gómez, J. Torres, and L. Rodríguez, "Development of a low-power wireless soil moisture monitoring system for smart agriculture," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 15796–15804, 2021.