



TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
MODALIDAD TESINA

Facultad de Ciencias Agrarias
Ingeniería Agronómica

Título:

**“Diseño y calibración de un sensor de humedad de suelos con
microcontroladores Arduino de código abierto para el
diagnóstico del contenido hídrico en suelos”**

Alumno: Pietragallo, Manuel

Director: Ing. Agr. (Mgt.) Federico Antonio Paredes

Año 2023

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	5
HIPÓTESIS.....	12
OBJETIVOS.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
CONCLUSIONES.....	30
BIBLIOGRAFÍA.....	31
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los componentes del sensor, modelos y su función.....	14
Tabla 2. Caracterización de los suelos empleados para la experiencia.....	22

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de las partes básicas del sensor empleando una placa Arduino UNO®.....	14
Figura 2. Representación de los elementos componentes empleando una placa Arduino UNO®.....	15
Figura 3. Imagen del prepozo para la prueba a campo del sensor.....	17
Figura 4. Equipo armado para la experiencia.....	19
Figura 5. Líneas de código utilizadas en la programación.....	21
Figura 6. Representación de la progresión de humedad gravimétrica.....	23
Figura 7. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Ensenada Grande..	24
Figura 8. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Treviño.....	24
Figura 9. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Don Deolindo.....	25
Figura 10. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Díaz de Vivar.....	25
Figura 11. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Tolosa.....	26
Figura 12. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Feldman.....	26

INTRODUCCIÓN

Importancia del agua en la agricultura

El agua es un recurso esencial para la producción agrícola, la seguridad alimentaria y el equilibrio de los ecosistemas. Sin embargo, el creciente consumo de agua se ha convertido en uno de los mayores desafíos para el desarrollo sostenible, especialmente con el aumento de la población y el cambio climático (FAO, 2019).

En la agricultura, el agua es un factor crucial que limita y condiciona la viabilidad de los cultivos. La fotosíntesis, la respiración, la transpiración, el transporte de nutrientes y la regulación de la temperatura del suelo dependen del agua. La capacidad del suelo para almacenar y ceder agua lo convierte en el principal proveedor de este recurso en los sistemas de producción convencionales (Quiroga, 2011). Por tanto, la captación, almacenamiento y uso eficiente del agua son aspectos cruciales para considerar en la planificación de sistemas agrícolas sostenibles. La humedad del suelo, es decir, la cantidad de agua presente en el suelo en un momento determinado también es un parámetro importante a monitorear en la gestión del agua en la agricultura (Porta Casanellas, 2003).

En los sistemas de producción convencionales, el suelo desempeña un papel fundamental como proveedor principal de agua para las plantas debido a su capacidad de almacenamiento y liberación. Por lo tanto, al planificar un sistema de producción, es necesario considerar aspectos como la captación de agua, la capacidad de almacenamiento y la eficiencia en su uso (Quiroga, 2011).

Humedad del suelo

El contenido de agua en el suelo, también conocido como humedad del suelo, se refiere a la cantidad de agua (en masa o volumen) presente en un suelo en un momento determinado (Porta Casanellas, 2003).

La humedad del suelo puede expresarse tanto en términos volumétricos, acordes al volumen, como en términos gravimétricos, basados en la masa (Baver et al., 1972). Esta última es la forma más común y básica de medirla, y se refiere a la masa de agua contenida en relación con la masa de los sólidos del suelo, generalmente expresada como un porcentaje. Para determinarla, se utiliza el método gravimétrico, que implica el secado de muestras de suelo en una estufa a 105°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante (Forsythe, 1975).

La humedad del suelo tiene un impacto significativo en diversas propiedades físicas, como la densidad aparente, el espacio aéreo (que se asemeja a la macroporosidad según Carter y Ball, 1993), la compactación, la penetrabilidad, la resistencia al corte, la consistencia y el color del suelo. Además, influye en procesos químicos, bioquímicos y en la actividad microbiana del suelo (Gavande, 1972). Es importante destacar que el contenido de agua en el suelo es altamente dinámico y está influenciado por factores climáticos, las características de las plantas, la profundidad del suelo y las condiciones físicas del perfil, así como también por la ubicación en el terreno del punto de estudio.

Suelos y regímenes hídricos en las provincias de Corrientes y Chaco

En la provincia de Corrientes, se observa una amplia diversidad de suelos, que se clasifican en siete órdenes reconocidos por el sistema de clasificación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (Soil Survey Staff, 2014). Estos órdenes incluyen los Alfisoles (29,4% de la superficie provincial), Molisoles (28,3%), Entisoles (18,8%), Inceptisoles (7%), Vertisoles (6,3%), Ultisoles (4,2%) y Histosoles (3,9%) (Escobar et al., 1996).

De la superficie total de la provincia, alrededor de 2.000.000 de hectáreas (22%) son aptas para la agricultura de secano (Escobar et al., 1996). Sin embargo, el exceso de agua es frecuente debido al clima y los suelos de la región. Aproximadamente el 59,5% de la superficie está ocupada por cuerpos de agua, lo que corresponde a suelos con un régimen hídrico acuático, caracterizados por anegamientos, encharcamientos e inundaciones de diversas intensidades. Este régimen hídrico implica que los suelos permanezcan bajo condiciones de inundación durante varios días al año, lo que resulta en anaerobiosis y reducción química del perfil en la zona de influencia de las raíces. Además, también se presenta el régimen údico en suelos bien drenados ubicados en posiciones de lomas a medias lomas. Esto implica que la sección de control del suelo no se seca en la mayoría de los años durante un período acumulativo de 90 días (Soil Survey Staff, 2014).

La provincia del Chaco se caracteriza por tener un relieve llano y se divide en dos regiones bien diferenciadas. La región Oriental comprende zonas húmedas y terrenos bajos, mientras que la región Occidental cuenta con suelos salinos y una vegetación adaptada a ambientes secos. En el sur de la provincia se encuentran los Bajos Submeridionales, que experimentan inundaciones rápidas. En contraste, el norte y oeste están dominados por la región conocida como "El Impenetrable", que abarca gran parte del territorio. Denominada así por no presentar paleocauces y por lo tanto, resultar inaccesible para los

colonos que la nombraron. (Torrellal et al., 2006). Esta llanura presenta una pendiente que se extiende de noroeste a sureste, lo cual se refleja en la dirección de los cursos de agua, los cuales se ven aún más afectados por las fuertes precipitaciones de los últimos años. En términos de características físicas de los suelos, según el estudio de clasificación realizado por el INTA (1996), se identifican cuatro órdenes de suelos predominantes en la provincia. Los Molisoles y Alfisoles son los más comunes, mientras que los Entisoles e Inceptisoles se encuentran en menor proporción, siendo estos últimos de formación incipiente. Los Molisoles representan más del 60% de la superficie de los terrenos en 12 departamentos de la provincia. Los Alfisoles suelen estar asociados a los Molisoles, pero su baja permeabilidad y contenido de nutrientes afectan el desarrollo de las actividades agrícolas. Tanto los Molisoles, los Inceptisoles como los Alfisoles, debido a su textura fina, tienen alta capacidad de retención de agua, aunque presentan limitaciones en cuanto al drenaje. Por otro lado, los Entisoles, con una mayor cantidad de arena, permiten una infiltración más rápida del agua y favorecen el drenaje. Una característica particular de los Alfisoles, que tienen textura arcillosa, es que en presencia de lluvias intensas se vuelven duros y compactos, lo que a menudo resulta en encharcamientos. Sin embargo, durante períodos de sequía, su capacidad de retención de agua beneficia la disponibilidad hídrica para las plantas (Plan de Gestión Integrada de Riesgos Agropecuarios de la Provincia del Chaco, 2019).

Importancia de conocer la humedad del suelo

A causa de los factores mencionados y las condiciones de los suelos de la región, conocer el contenido de humedad del suelo constituye una gran ventaja a la hora de tomar decisiones para llevar a cabo un proceso productivo como la labranza o la siembra, íntimamente ligados a la humedad superficial. El monitoreo regular de este parámetro del puede proporcionar información valiosa para optimizar el riego, mejorar la eficiencia del uso del agua y tomar decisiones informadas sobre la gestión de los cultivos.

Existen métodos directos e indirectos para medir esta variable, y su aplicación adecuada puede contribuir a una mejor gestión de los recursos hídricos y una producción agrícola más eficiente, contribuyendo a sistemas de cultivo más sustentables.

Métodos de medición de humedad del suelo

En la actualidad, se disponen de diversas herramientas y métodos que permiten medir el contenido de agua del suelo. Estos métodos pueden ser directos, obteniendo una medición

precisa del contenido real de agua en el suelo, o indirectos, estimando la humedad volumétrica a partir de otras mediciones basadas en las propiedades del suelo. Estos enfoques indirectos son útiles cuando se requiere una estimación rápida y no se dispone de recursos o equipo especializado.

Algunos de los métodos directos utilizados incluyen la ya mencionada medición gravimétrica y la medición volumétrica, que se realiza utilizando sondas o sensores de humedad para obtener el volumen de agua presente en una determinada cantidad de suelo. Por otro lado, los métodos indirectos se basan en la relación entre la humedad del suelo y otras variables que pueden ser medidas de manera más sencilla. Por ejemplo, la conductividad eléctrica del suelo puede utilizarse como indicador de la humedad, ya que existe una correlación entre ambas. Otro método indirecto común es el uso de sensores de humedad del suelo, que miden propiedades eléctricas o la capacitancia del suelo para estimar el contenido de agua.

La elección del método de medición dependerá de la disponibilidad de recursos, la escala de estudio y los objetivos específicos de la investigación o la gestión agrícola.

Es importante destacar que, debido a su naturaleza destructiva y al tiempo requerido para llevar a cabo las mediciones, el método de humedad gravimétrica es más adecuado para estudios de investigación o muestreos puntuales en lugar de aplicaciones a gran escala o monitoreo continuo. Sin embargo, su importancia radica en que sirve como base para la validación y calibración de otros métodos de medición de humedad del suelo, asegurando la precisión y comparabilidad de los resultados obtenidos.

Dentro de los métodos indirectos, uno de los más ampliamente utilizados en la actualidad es el método de Reflectometría de Dominios Magnéticos de Tiempo (TDR, por sus siglas en inglés). Este método se basa en la relación entre la constante dieléctrica de la matriz del suelo y el contenido volumétrico de agua. A diferencia del método gravimétrico, el TDR es un método no destructivo que permite realizar mediciones rápidas in situ.

El TDR ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, es un método rápido que permite obtener mediciones de manera eficiente en el campo. Además, se puede realizar mediciones continuas en un mismo punto, lo que brinda información valiosa sobre la variación temporal del contenido de agua en el suelo. También es capaz de establecer perfiles de humedad, lo que permite visualizar cómo varía la humedad a diferentes profundidades del suelo. Otro beneficio importante es la precisión de las mediciones, con un impacto mínimo en el suelo.

Sin embargo, el TDR requiere una calibración adecuada para su uso, especialmente en suelos con alto contenido de materia orgánica, ya que esto puede afectar la relación entre la constante dieléctrica y el contenido de agua. Además, uno de los principales desafíos para la implementación generalizada del TDR es el costo de los equipos comerciales, que puede ser relativamente alto. Esto disminuye su accesibilidad y su aplicación en un contexto más amplio.

A pesar de estas limitaciones, el método de TDR sigue siendo ampliamente utilizado debido a sus ventajas en términos de rapidez, medición continua y precisión. La continua investigación y desarrollo en esta área busca superar las limitaciones actuales y mejorar la eficiencia y accesibilidad de los equipos, lo que podría llevar a un mayor uso generalizado de este método en el futuro.

Alternativas económicas y prácticas para medir la humedad del suelo

Si bien los métodos mencionados ofrecen una forma indirecta de medir la humedad del suelo, su uso está más restringido por diversas razones, como su complejidad técnica, la necesidad de equipos especializados y su alto costo. Estas limitaciones hacen que su aplicación sea más común en contextos de investigación o para productores agrícolas que pueden asumir la inversión necesaria para adquirir estos equipos sofisticados y obtener mediciones precisas y rápidas de la humedad del suelo en campo.

No obstante, dada la necesidad de contar con opciones más accesibles y económicas, ha surgido la demanda de métodos de bajo costo, pero precisos y rápidos, para medir la humedad del suelo. Actualmente, se están explorando y desarrollando diversas alternativas, como sensores de humedad basados en capacitancia, resistencia eléctrica y otros principios físicos, que ofrecen un enfoque más económico y práctico para realizar estas mediciones.

Estas opciones más asequibles pueden ser una solución viable tanto para investigadores como para agricultores que buscan obtener información rápida y precisa sobre la humedad del suelo sin incurrir en altos costos. A medida que avanza la tecnología y se optimizan estos métodos de bajo costo, es posible que se conviertan en herramientas más ampliamente utilizadas en el monitoreo y manejo de la humedad del suelo en diversos contextos agrícolas y de investigación.

Una opción que cumple con las condiciones de ser económica, precisa y rápida para medir la humedad del suelo es utilizar un medidor de humedad de suelos diseñado para microcontroladores de código abierto, como los de la marca Arduino®. Los

microcontroladores Arduino® son circuitos integrados programables que permiten ejecutar instrucciones previamente definidas por el usuario de manera autónoma. Arduino® es una compañía de hardware y software de código abierto que fabrica placas con microcontroladores reprogramables y conexiones versátiles para conectar sensores y actuadores.

Mediante el uso de un microcontrolador Arduino® y un sensor de humedad de suelos compatible, es posible construir un dispositivo que pueda medir la humedad del suelo de forma precisa y rápida. Los sensores de humedad de suelos utilizan diferentes principios, como la capacitancia o la resistencia eléctrica, para medir el contenido de agua en el suelo. Estos sensores se conectan al microcontrolador Arduino® a través de sus entradas analógicas o digitales, y se pueden programar para que realicen mediciones periódicas y envíen los datos a un dispositivo de visualización o almacenamiento.

La ventaja de utilizar Arduino® y sensores de humedad de suelos de código abierto es que ofrecen una solución de bajo costo y personalizable. La comunidad de usuarios de Arduino® comparte libremente proyectos, código y recursos en línea, lo que facilita el acceso a información y la posibilidad de adaptar y personalizar el sistema de medición de humedad del suelo según las necesidades específicas.

Es importante tener en cuenta que, si bien los medidores de humedad de suelos basados en Arduino® pueden ser una opción asequible y versátil, es necesario contar con los conocimientos y habilidades técnicas para construir y programar el dispositivo de manera adecuada. También es importante considerar la calibración y validación del sensor utilizado para garantizar la precisión de las mediciones.

Se ha observado que existe una falta de estudios que analicen el comportamiento de estos sensores en suelos contrastantes, lo que puede afectar la precisión de las mediciones. Por ejemplo, estudios realizados sobre el uso y aplicación de sensores de humedad de suelo no han abarcado suelos con diferentes texturas, estructuras y composiciones químicas (Galindo Araque, 2017). Tampoco se han realizado análisis en las condiciones locales de los suelos del Nordeste Argentino (NEA), lo que hace necesario llevar a cabo investigaciones que permitan conocer el comportamiento de estos sensores en suelos de la región y establecer las condiciones necesarias para su correcta utilización.

En caso de que los resultados de la calibración y los estudios sean satisfactorios, la utilización de estos sensores en los suelos de la región podría brindar una forma rápida y precisa de medir el contenido de humedad, lo que a su vez mejoraría la toma de decisiones en el manejo agrícola. De esta manera, los sensores de humedad del suelo con

microcontroladores Arduino® se presentan como una alternativa prometedora entre los instrumentos existentes para realizar estas mediciones.

HIPÓTESIS

La hipótesis planteada es que los microcontroladores Arduino® con sensores de resistividad, previamente calibrados para las condiciones específicas de los suelos en los que se utilizarán, permiten obtener valores precisos y rápidos del contenido de humedad del suelo, ya sea en forma volumétrica o gravimétrica.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y calibrar un sensor de humedad con microcontroladores de código abierto Arduino® para la lectura directa del contenido de humedad de diferentes suelos como herramienta de diagnóstico del contenido hídrico de suelos.

Objetivos Específicos

1. Diseñar un sensor de humedad simple y un método de evaluación en condiciones controladas.
2. Determinar la correlación de lecturas realizadas con el sensor de humedad Arduino® con el contenido de humedad gravimétrica de suelos contrastantes.
3. Evaluar el sensor en suelos en condiciones reales de producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de realización

El trabajo fue llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias ubicada en el campus Sargento Cabral de la ciudad de Corrientes, en la cátedra de Edafología donde se realizaron las determinaciones de los suelos y en la cátedra de Manejo y conservación de suelos.

Las pruebas a campo y las tomas de muestras fueron realizadas en el INTA Corrientes y en diferentes puntos de la región para obtener diversidad de condiciones.

Diseño de la experiencia

El trabajo constó de tres etapas:

Etapla 1. Diseño y armado del equipo

Etapla 2. Prueba y calibración del sensor en condiciones controladas

Etapla 3. Validación a campo del sensor.

Registro de datos

Los datos se registraron directamente en una planilla de Excel creada para tal fin, con una hoja para cada día de mediciones.

Etapla 1. Diseño y armado del equipo

Diseño del sensor

En la Tabla 1 se detallan los principales componentes del equipo y sus funciones. Los microcontroladores Arduino® son dispositivos programables que ofrecen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos. Su utilización requiere de un proceso de programación en el que se define el funcionamiento del dispositivo y las acciones que realizará una vez conectado a la fuente eléctrica. Este programa, también conocido como "sketch", se carga en la memoria de la placa Arduino® a través de una conexión USB utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) proporcionado por Arduino. El IDE ofrece herramientas y librerías que facilitan la programación en un lenguaje de programación simplificado basado en C/C++. Una vez programado, el microcontrolador Arduino® puede interactuar con una variedad de periféricos como luces, motores,

actuadores y sensores, lo que permite su utilización en diversas aplicaciones. El uso de microcontroladores Arduino® brinda flexibilidad y versatilidad, siendo una opción accesible y de bajo costo para el desarrollo de proyectos electrónicos y automatización.

Tabla 1. Descripción de los componentes del sensor, modelos y su función.

Componente	Modelo	Función
Placa Arduino	Arduino UNO	Control y alimentación del sensor
Sensor de humedad de suelo	YL-69	Medir de forma indirecta el contenido de humedad
Potenciómetro	LM393	Calibración del sensor

El equipo se puede representar esquemáticamente en 4 partes, según se observa en la Figura 1.

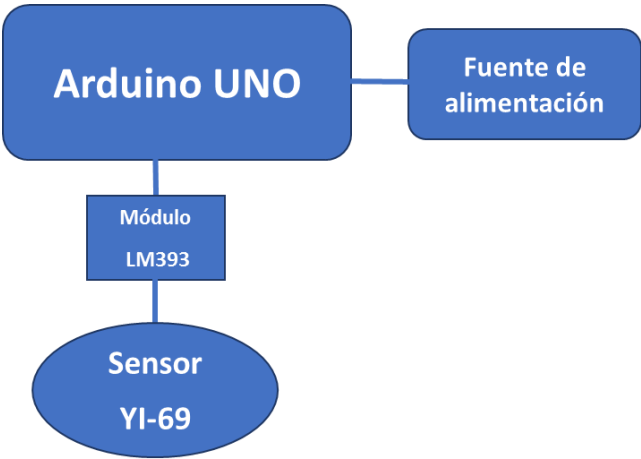


Figura 1. Diagrama de las partes básicas del sensor empleando una placa Arduino UNO®.

Para conectar el sensor YL-69 con su respectivo módulo potenciómetro LM393 a la placa se siguieron los diagramas de conexión del fabricante y se fijaron en soportes para su manipulación y evitar la desconexión de los componentes.

El sensor de humedad YL-69 se conectó al módulo LM393 mediante dos pines y este último se enlazó a la placa Arduino mediante tres conectores, uno para la alimentación de 5 Voltios, otro para la conexión a tierra (GND) y el último que permite recibir la información que este sensor recopila que luego será transmitida al usuario (Figura 2). El display se conectó a la misma a través del módulo I2C para simplificar las conexiones utilizando un menor número de pines y cables.

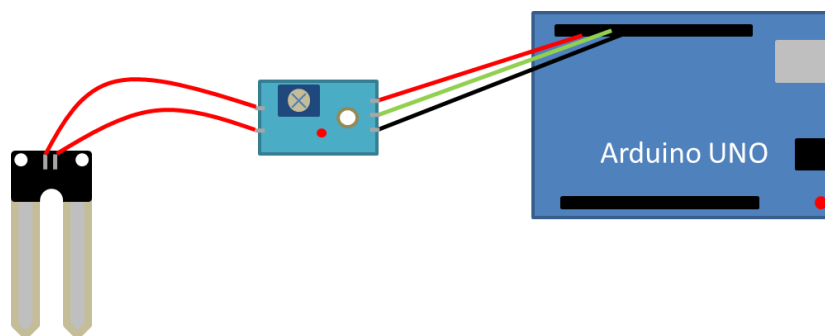


Figura 2. Representación de los elementos componentes empleando una placa Arduino UNO®.

Programación del código fuente

Posteriormente, a la placa se subió el código fuente con las sentencias necesarias para dar funcionamiento al sensor y mostrar las lecturas obtenidas directamente en el display y así prescindir de una computadora para conocer los valores de este.

Etapas 2. Prueba y calibración del sensor en condiciones controladas

Diseño experimental y tratamientos. En el marco de la evaluación del sensor en condiciones controladas, se llevó a cabo un ensayo experimental utilizando 6 suelos diferentes. El diseño utilizado fue en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con 15 repeticiones. Cada bloque correspondió a un suelo diferente, y las repeticiones se realizaron en diferentes momentos para obtener una muestra estadísticamente significativa. En total, se obtuvieron 90 unidades experimentales.

Suelos destinados para el análisis. Las muestras de suelo que se utilizaron fueron tomadas del epipedón (0-20 cm) en lotes con historial de uso agrícola de sitios de condiciones contrastantes.

Los suelos utilizados fueron clasificados según Soil Taxonomy como:

- Udipsamentes árgicos, clase textural Arenosa (Ent). Serie Ensenada grande.
- Argiduol ácuico. clase textural Franco arenosa (Mol). Serie Treviño.

- Hapludert crómico, clase textural Franco limosa (Ver). Serie Don Deolindo.
- Kandihumult típico, clase textural Arcillosa (Ult). Serie Díaz de Vivar.
- Ustocrept údico, clase textural Arcilloso (Inc). Serie Tolosa.
- Natrustalf ácuico, clase textural Arcillosa (Alf). Serie Feldman.

Las muestras fueron tomadas con pala, en lotes con manejo uniforme durante los últimos 5 años, empleando 3 submuestras por muestra.

Una vez recibidas las muestras en laboratorio fueron secadas al aire, molidas y tamizadas por tamiz de 2 mm. Una vez concluida esta tarea se procedió a caracterizar los suelos realizando las siguientes determinaciones por duplicado:

- Densidad aparente (Da). Por el método de la probeta a partir de muestras alteradas (molidas y tamizadas por 2 mm).
- Densidad real o de partícula: Método del Picnómetro con empleo de vacío (Blake y Hartge, 1986, citado en Klute, 1986).
- Porosidad total (%) y Espacio aéreo (%) por cálculo sobre la base de los datos obtenidos de densidad aparente y densidad de partícula.
- Humedad equivalente, por el método de la centrífuga (Montenegro González et al., 1990) a 2440 r.p.m. durante 40 minutos (velocidad equivalente a 1000 veces la fuerza de la gravedad = 1 atm de presión).
- Materia orgánica: Método de Walkley y Black modificado (Nelson & Sommers, 1996 citado en Page, 1982).
- Textura: Método densimétrico de Bouyoucos (Dewis & Freitas, 1970).
- Conductividad eléctrica, por el método conductimétrico, relación 1:50.
- pH: Potenciométricamente en relación 1:2,5 en KCl 0,1 M (Dewis & Freitas, 1970).

Conducción de la experiencia, muestreos y determinaciones. Los contenedores utilizados fueron de fabricación propia. Los mismos se realizaron con caños de PVC de 35 mm de diámetro en secciones de 6 cm y colocando en su base una malla plástica para contener el suelo y permitir el ingreso del agua. Antes de cargar estos recipientes se colocó en su base un disco de papel de filtro para evitar la pérdida de suelo.

Inicialmente se llevó a estado de saturación a todas las muestras ubicándolas en un recipiente con una lámina de agua de aproximadamente 1 centímetro, por 48 hs. Una vez que todos los contenedores se hallaron en estado de saturación, se quitó el agua y se comenzaron a realizar las mediciones pertinentes durante 15 días consecutivos.

Lectura con el sensor. Para las lecturas, se seleccionó un contenedor aleatoriamente y se introdujo el sensor de humedad en tres puntos distintos, esperando en cada momento que la lectura se estabilice para registrarla y lavando el sensor con agua destilada luego cada medición.

Medición de la humedad gravimétrica. Posteriormente a la lectura con el sensor, de cada contenedor se tomaron tres muestras y cada una se pesó inmediatamente para conocer su peso húmedo y se llevaron a estufa por 24hs (hasta peso constante), al día siguiente se registró el peso seco de cada muestra para obtener, por diferencia, el contenido de humedad gravimétrica de las mismas. Estas mediciones se repitieron diariamente en cada uno de los seis suelos en estudio.

Los datos obtenidos fueron siempre registrados en una planilla de cálculo para su posterior análisis.

Etapas 3. Validación a campo del sensor.

Una vez completadas las determinaciones en condiciones controladas, se procedió a llevar a cabo la validación del sensor en condiciones de campo. Para ello, se realizaron mediciones del contenido de humedad en un suelo agrícola (serie Treviño) de la Estación Experimental Agropecuaria Corrientes del INTA, como se muestra en la Figura 2.

Para las mediciones a campo, se seleccionaron puntos aleatorios dentro del área de cultivo de avena negra (*Avena strigosa* Schreb.). En cada punto seleccionado, se excavó un prepozo de 20 cm de profundidad, donde se introdujo el sensor paralelamente a la superficie del suelo para obtener la lectura correspondiente a la franja de 0-10 cm de profundidad (Figura 3).

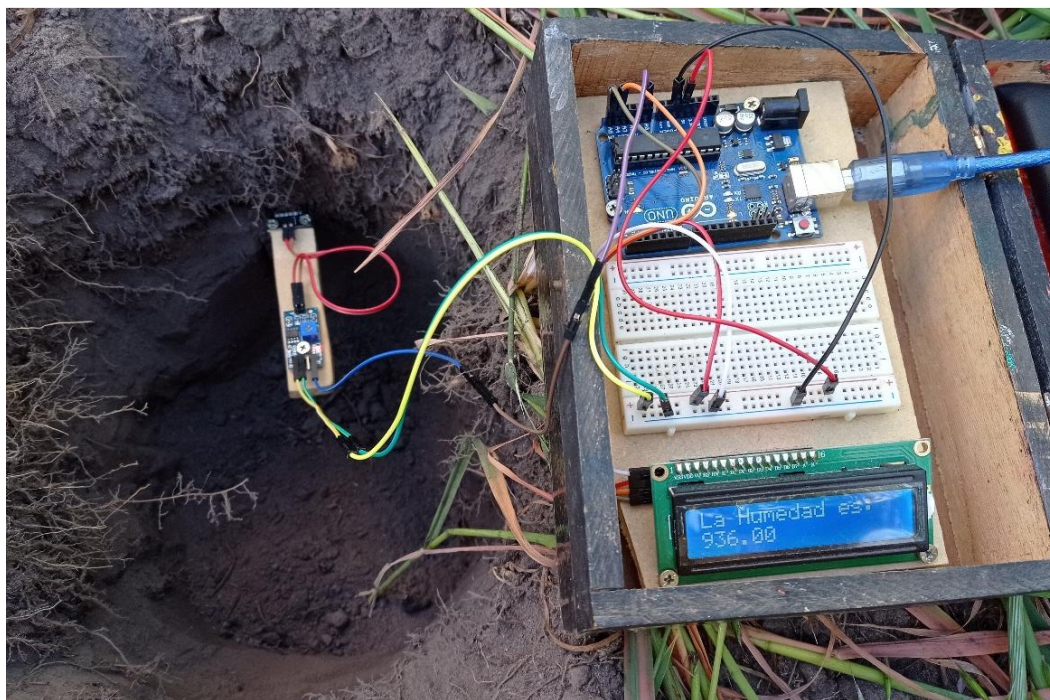


Figura 3. Imagen del prepozo para la prueba a campo del sensor.

Inmediatamente después de realizar cada lectura con el sensor, se extrajo una pequeña muestra de suelo en la profundidad evaluada utilizando un barreno. Esta muestra se selló adecuadamente para su posterior determinación del contenido de humedad gravimétrica en el laboratorio.

Este procedimiento se repitió en varios puntos dentro del área de cultivo, abarcando diferentes condiciones del suelo y considerando la variabilidad espacial existente. De esta manera, se obtuvieron mediciones de humedad en campo que posteriormente serían comparadas con los resultados de las determinaciones gravimétricas.

Análisis de resultados

Una vez obtenidos los valores de humedad gravimétrica y las lecturas del sensor en diferentes momentos, se procedió a realizar una comparación entre ambos conjuntos de datos. El objetivo fue evaluar el comportamiento de los datos y determinar si existía una correlación significativa entre ellos.

Para este análisis, se utilizó una prueba de correlación, siguiendo la metodología descrita por Steel y Torrie (1993). Esta prueba permite determinar la fuerza y la dirección de la relación entre dos variables.

Se calculó el coeficiente de correlación, que varía entre -1 y 1. Un valor de -1 indica una correlación negativa perfecta, 0 indica ausencia de correlación y 1 indica una correlación

positiva perfecta. Además, se realizó una prueba de significancia estadística para determinar si la correlación observada era estadísticamente significativa.

El análisis de correlación permite establecer si existe una relación consistente entre las mediciones del sensor y los valores de humedad gravimétrica obtenidos, lo cual indicaría la capacidad del sensor para proporcionar mediciones precisas y confiables del contenido de humedad en el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa 1. Diseño y armado del equipo

La tarea de ensamblar placas Arduino y sus sensores correspondientes es relativamente sencilla y no requiere herramientas especiales. Los puntos de conexión en la placa están claramente identificados según su función, lo que facilita el proceso de montaje. Sin embargo, durante el ensamblado, se encontró necesario soldar ciertos componentes con estaño para asegurar una conexión adecuada. También se utilizó cables "jumper" de mayor longitud para permitir una manipulación más cómoda del sensor sin desconectarlo de la placa. Los componentes fueron fijados a un soporte de madera, lo que resultó en un dispositivo fácilmente manipulable y transportable para realizar mediciones tanto en laboratorio como en campo (Figura 4).

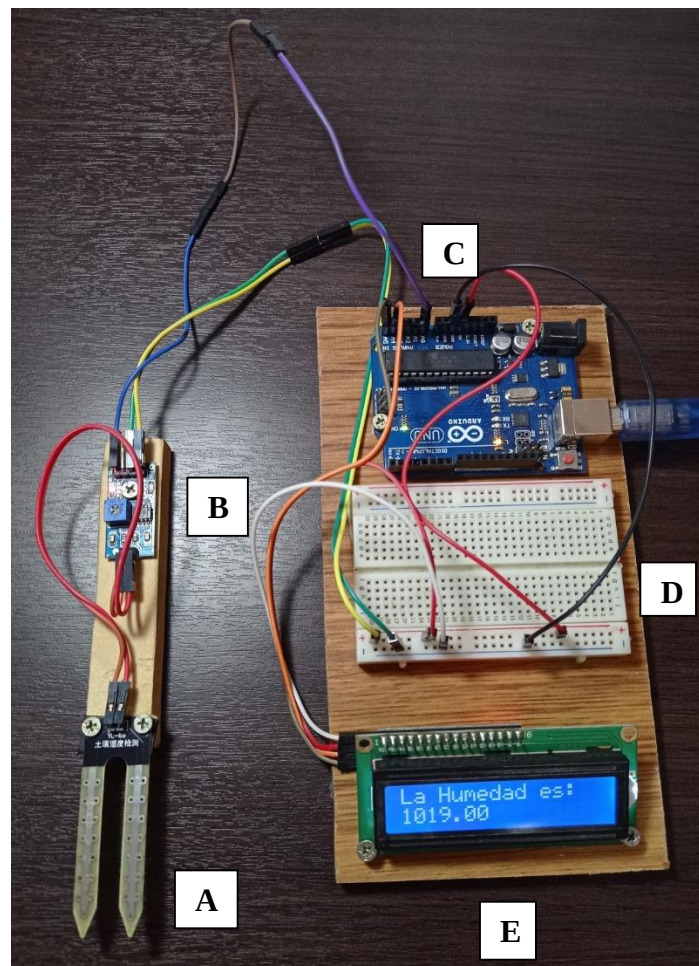


Figura 4. Equipo armado para la experiencia.

Referencias: A: Sensor de humedad de suelo. B: Módulo LM393. C: Placa Arduino. D: Protoboard. E: Display mostrando la lectura del sensor en el aire.

El código de programación utilizado para el funcionamiento del sensor se ensambló recopilando fragmentos de otros usuarios disponibles en diversas fuentes, como la página web "Arduino Cloud", que es una plataforma de código abierto donde los usuarios de todo el mundo pueden acceder a códigos de programación para diferentes sensores y actuadores compatibles con la placa Arduino (Arduino Cloud, 2023). Una vez obtenido el código base, se realizaron modificaciones para adaptarlo a los requisitos específicos del proyecto. Por ejemplo, se ajustó el tiempo de espera entre lecturas, ya que estas se realizan en un bucle con una espera predeterminada de 1 segundo, y se modificó la forma en que los datos se muestran en la pantalla. Es importante destacar que el display utilizado para las lecturas se puede reemplazar por la lectura de los valores en una computadora o incluso en un dispositivo móvil a través de un adaptador y una aplicación compatible, lo que brinda una mayor versatilidad.

A continuación, se presentan las líneas de código utilizadas, junto con las modificaciones realizadas para adaptarlas a las condiciones de trabajo (ver Figura 5).

```
float lec;

#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define I2C_ADDR    0x27

LiquidCrystal_I2C      lcd(I2C_ADDR,2, 1, 0, 4, 5, 6, 7);

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    lcd.begin(16,2);    // Inicializar el display con 16 caracteres 2
    líneas
    lcd.setBacklightPin(3,POSITIVE);
    lcd.setBacklight(HIGH);
}

void loop() {
    lec = analogRead(A0);
```

```

Serial.print("La Lectura es: ");
Serial.println(lec);

if(lec<=1023){
    Serial.println("Sensor desconectado / 0% de Humedad");
    lcd.home ();                      // go home
    lcd.print("La Humedad es:");
    lcd.setCursor ( 0, 1 );          // go to the 2nd line
    lcd.print(lec);

    delay(1000); lcd.home ();        // go home
    lcd.print("                      ");
    lcd.setCursor ( 0, 1 );          // go to the 2nd line
    lcd.print("                      ");
}
}

```

Figura 5. Líneas de código utilizadas en la programación.

Nota: Los colores indican la función de los diferentes comandos al programar.

En cuanto al aspecto económico, los componentes y accesorios necesarios para armar este equipo tienen un costo bajo. Esto permite construir un dispositivo de estas características por menos del 1% del costo de un equipo profesional. Además, estos componentes son fácilmente accesibles a través de internet o en tiendas de electrónica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que se ha observado una falta de precisión en las mediciones realizadas, por lo que es necesario considerar que su uso estará limitado a automatizaciones de riego basadas en si el suelo está humedecido o seco, sin poder identificar un porcentaje de humedad específico.

Etapas 2. Prueba y calibración del sensor en condiciones controladas

Caracterización de los suelos empleados

Durante el estudio, se llevaron a cabo diversas determinaciones para conocer las características de los suelos utilizados. Estas determinaciones revelaron una amplia

diversidad en términos de las propiedades físico-químicas de los suelos, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de los suelos empleados para la experiencia.

Muestra	Clase Textural	Da (g cm ⁻³)	Dr (g cm ⁻³)	Porosidad Total (%)	Espacio aéreo (%)	MO (%)	pH	CE μ Siemens (x10 ¹)	Humedad Equivalente
Ensenada grande	Arenoso	1,48	2,54	41,89	31,43	1,5	7,33	2,5	4,85
Udipsament árgico									
Treviño	Franco	1,28	2,67	51,65	31,71	3,6	6,88	3,5	14,97
Argjudol ácuico	Arenoso								
Don Deoilndo	Franco	1,23	2,51	50,97	23,84	4,0	6,27	5	27,11
Hapludert crómico	Arcilloso								
Díaz de Vivar	Arcilloso	1,10	2,70	59,34	30,67	5,9	4,28	3,1	29,88
Kandihumult típico									
Tolosa	Arcilloso	1,01	2,58	60,92	32,33	5,5	5,8	6,7	28,72
Ustocrept údico									
Feldman	Franco	1,15	2,55	55,10	26,52	6,0	5,78	8,2	22,98
Natrustalf ácuico	Arcilloso								

Referencias: Da: densidad aparente, método de la probeta (g cm⁻³); Dr: densidad real, método del picnómetro (g cm⁻³); Porosidad total (%) y espacio aéreo (%), por cálculo sobre la base de los datos obtenidos de densidad aparente y densidad de partícula; MO: materia orgánica, método de Walkley y Black modificado (%); pH: Método potenciométrico, relación 1:2,5 en KCl 0,1 M; CE: conductividad eléctrica, método conductimétrico, relación 1:50 (μ Siemens (x10¹)); Humedad equivalente: por el método de la centrífuga.

Las características físico-químicas de los suelos tienen un impacto significativo en su comportamiento con respecto al contenido de humedad, lo que permitió anticipar que las curvas de desecación serían notablemente diferentes entre ellos. Se observó que los suelos con mayor contenido de arcilla tienen una mayor retención de agua en condiciones de capacidad de campo, lo cual se estima a través de la humedad equivalente. Por lo tanto, es de esperar que el sensor de humedad registre valores más cercanos a 0 en estos suelos. No obstante, el parámetro que mostró la mayor variabilidad entre las muestras fue la Conductividad Eléctrica (CE), lo cual puede generar problemas en las mediciones con el sensor Arduino debido a su funcionamiento. Los suelos 5 y 6, con una CE superior a 4 y un pH inferior a 8.5, podrían clasificarse como suelos salinos.

Calibración

Inicialmente, se calculó el promedio de las mediciones diarias para determinar el contenido de humedad del suelo antes y después del proceso de secado en estufa, así como las lecturas proporcionadas por el sensor. Estos datos se utilizaron para calcular el

contenido de humedad gravimétrica en porcentaje de cada muestra en cada momento de lectura (Figura 6).

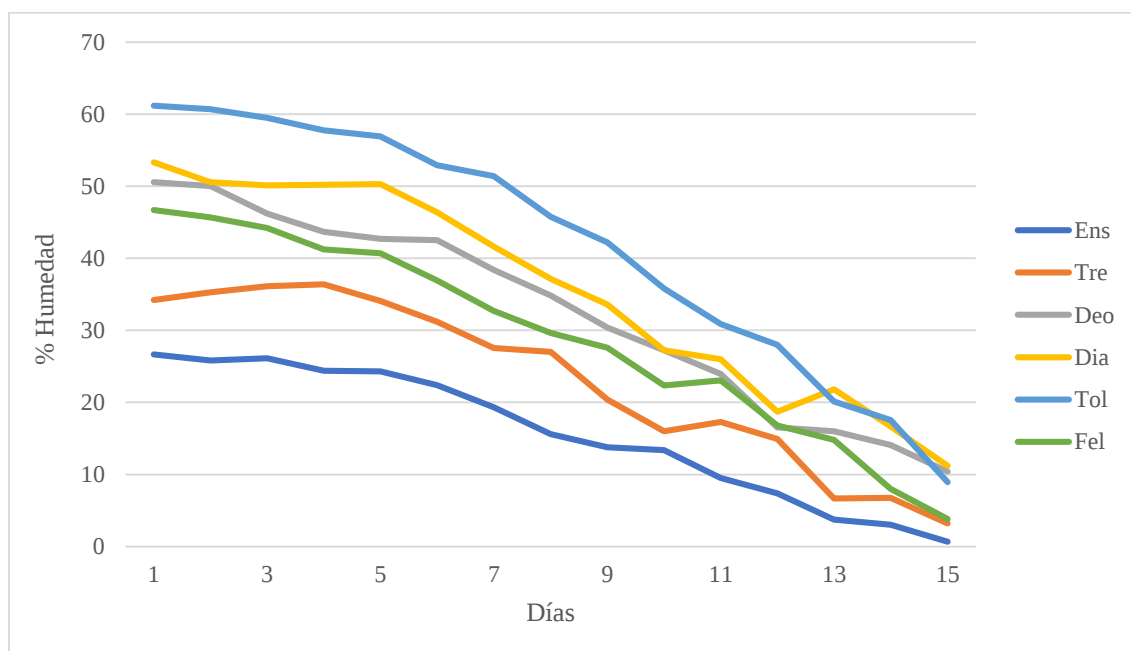


Figura 6. Representación de la progresión de humedad gravimétrica.

El gráfico muestra claramente que los suelos de textura arenosa (Ens y Tre) experimentaron un proceso de desecación más rápido en comparación con otros tipos de suelos. Además, se observa que el contenido mínimo de humedad en estos suelos es menor, lo cual se debe a su menor capacidad de retención de humedad y a un punto de marchitez permanente más bajo. Esto indica que los suelos arenosos pueden perder humedad más rápidamente y alcanzar niveles de sequedad más pronunciados en comparación con suelos de otras texturas.

Análisis de resultados

Los valores medidos por el método gravimétrico fueron comparados con el valor de humedad adimensional obtenido con el sensor para conocer si existía alguna correlación entre ambos. Con esta finalidad se sometieron los datos a una prueba de correlación cuadrática, al observar que esta se adecuaba mejor al comportamiento de estos y cómo se correlacionaban las lecturas del sensor con la disminución real del contenido de humedad.

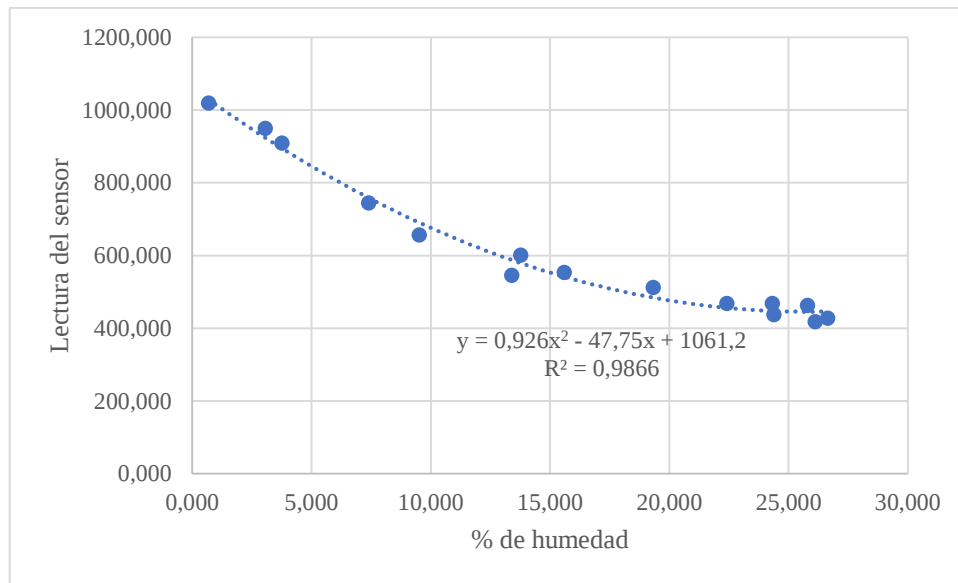


Figura 7. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Ensenada Grande.

En la mayoría de los casos, se encontraron ecuaciones que describieron adecuadamente el comportamiento del sensor en relación con las variaciones reales de humedad en las muestras. Sin embargo, se observó que en los suelos Treviño y Deolindo no se pudo encontrar una ecuación que reflejara su comportamiento de manera precisa (Figura 8 y 9).

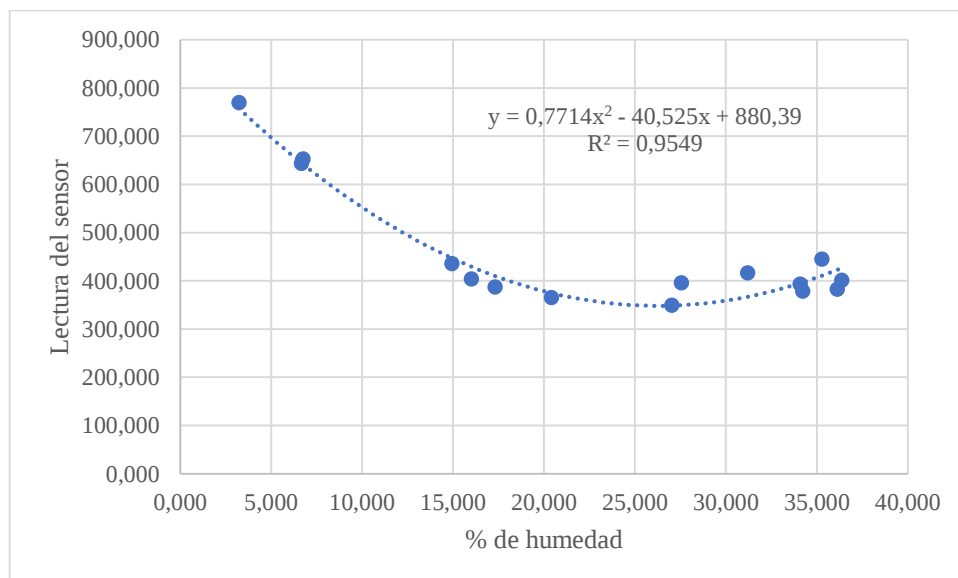


Figura 8. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Treviño.

Se investigó la posible causa de la discrepancia mencionada y se consideró inicialmente el contenido de sales en estos suelos. Sin embargo, esta hipótesis fue descartada al

observar que otros suelos con mayor contenido de sales mostraron resultados esperados en las mediciones del sensor.

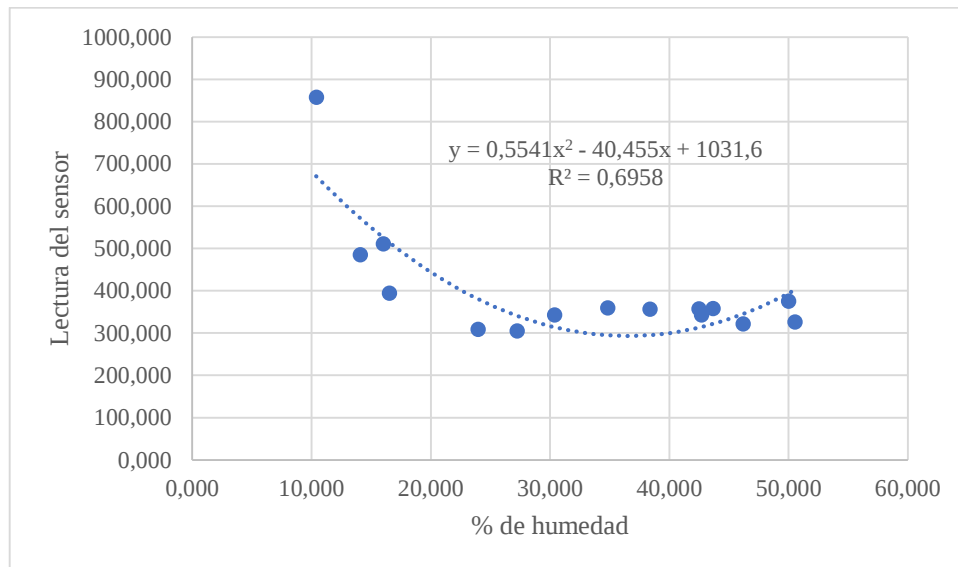


Figura 9. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Don Deolindo.

También se planteó la posibilidad de que el contenido de algún elemento que reaccionara con las cargas eléctricas del sensor pudiera influir en las lecturas, generando valores no directamente relacionados con la humedad, sino con las cargas de estos elementos.

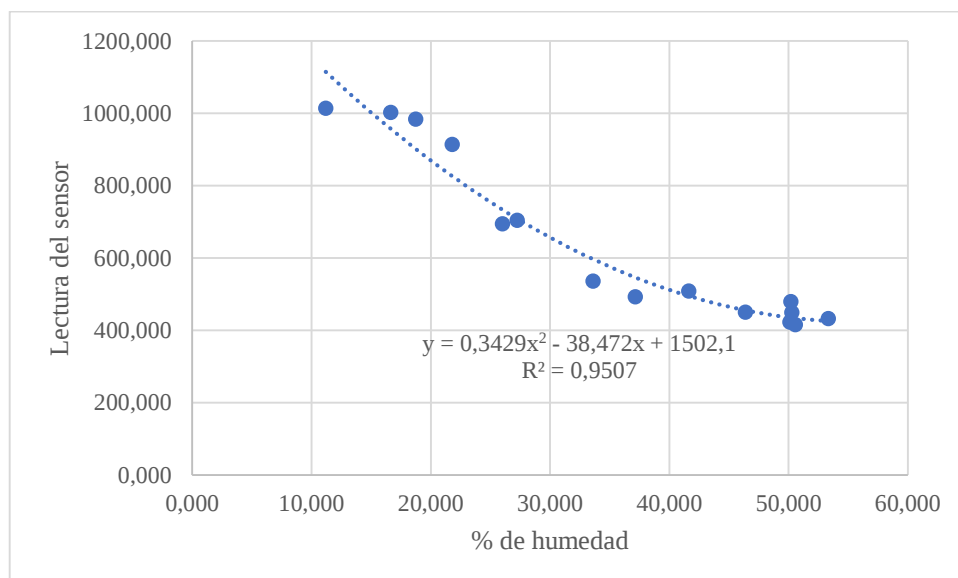


Figura 10. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Díaz de Vivar.

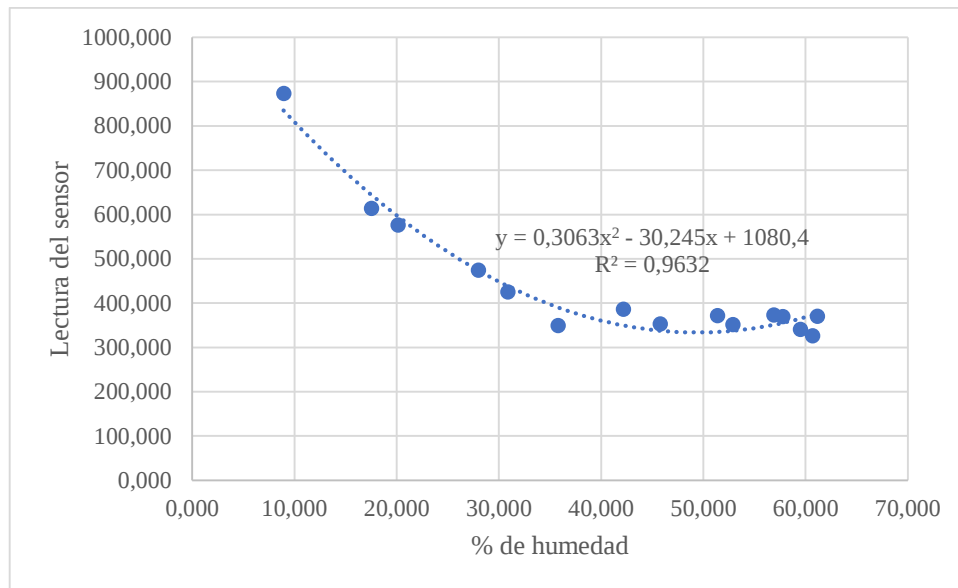


Figura 11. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Tolosa.

Además, se consideró la posibilidad de que la presencia de ciertos elementos en los suelos pudiera interactuar con las cargas eléctricas del sensor, lo cual podría afectar las lecturas y generar valores que no estuvieran directamente relacionados con la humedad, sino con las características de esos elementos y sus cargas eléctricas.

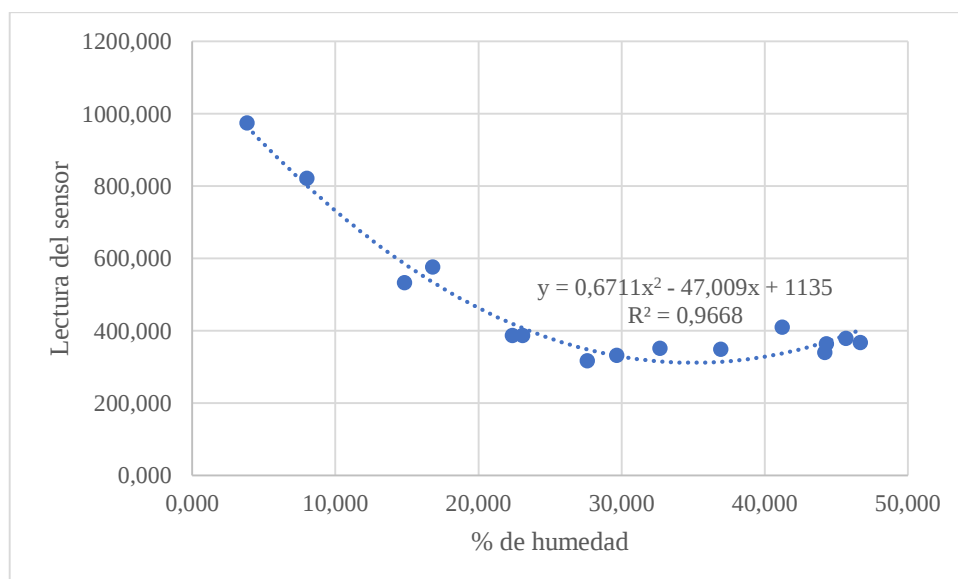


Figura 12. Gráfico de correlación cuadrática del suelo de la serie Feldman.

En varios casos, se observó que la tercera medición en un contenedor mostraba un valor más alto de lo esperado. Una posible explicación de este fenómeno podría estar relacionada con la polarización eléctrica del suelo durante las mediciones con el sensor,

ya que su método se basa en una medición indirecta del agua a través de la conductividad eléctrica. Además, este resultado también podría atribuirse a la entrada de aire en la muestra al insertar y extraer el sensor en dos ocasiones previas a realizar esa última medición.

Se utilizó una prueba de correlación de Pearson para determinar la relación entre las mediciones, y se encontró que la humedad de la mayoría de los suelos estudiados no se correlaciona de manera lineal con las lecturas del sensor. Por lo tanto, se realizó un análisis gráfico que reveló que las variables se ajustan mejor a un modelo polinómico en todos los casos, con un valor de r^2 considerable. Esto permitió obtener ecuaciones que predicen el comportamiento del sensor al medir el contenido de humedad de los suelos.

Sin embargo, durante la prueba de campo en uno de los suelos estudiados (Treviño), no se logró predecir de manera precisa el contenido de humedad gravimétrica utilizando el sensor. Se registraron valores del sensor en puntos específicos y a profundidades determinadas, y simultáneamente se recolectaron muestras que luego se llevaron al laboratorio para determinar el contenido real de humedad mediante el método de secado en estufa hasta peso constante. Los valores obtenidos del sensor no concuerdan con las expectativas del contenido real de humedad, incluso después de realizar la calibración utilizando la información obtenida en el laboratorio.

CONCLUSIONES

Se diseñó un sensor de humedad de suelos ensamblando la placa Arduino UNO, el display, el sensor YL-69 y el potenciómetro LM393 para crear una herramienta portátil, económica y accesible que permitiera realizar las mediciones propuestas. Durante el proceso de calibración con los suelos bajo estudio, se observó que en algunos casos se logró establecer una correlación entre los valores medidos con el sensor y aquellos obtenidos mediante el procedimiento de humedad gravimétrica en el laboratorio, mientras que en otros casos, esta correlación no se manifestó de manera consistente. Estas variaciones pueden deberse a varios factores inherentes a los suelos, así como a la interacción entre el sensor y los componentes de cada muestra. Esta discrepancia también se manifestó en la evaluación de campo, donde resultó difícil predecir con exactitud el contenido de humedad real del suelo utilizando el dispositivo, a pesar de haber observado cierta correlación en el entorno de laboratorio con la muestra proveniente de ese lote.

Estos resultados indican que, a pesar de realizar una etapa de calibración en laboratorio, el dispositivo no sería adecuado para conocer el contenido real de humedad del suelo en los que se destinaría su uso.

Actualmente, existe una nueva versión del instrumento llamada higrómetro capacitivo, que muestra características prometedoras para ser una herramienta que cumpla con los objetivos planteados en este trabajo. Este tipo de sensor ofrece una medida más precisa del contenido de humedad del suelo y podría someterse a pruebas similares a las descritas anteriormente para determinar si podría ser una alternativa viable a los métodos convencionales de medición de humedad del suelo, ampliando las pruebas a campo para mejorar la aplicabilidad del método a condiciones reales de producción.

BIBLIOGRAFÍA

- Arduino. (28 de agosto de 2022). ¿Qué es Arduino? <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Arduino Cloud. (15 de Enero de 2023). <https://cloud.arduino.cc/>
- Baver, L.D.; W.H. Gardner y W.R. Gardner (1972). Soil Physics. 4th ed. John Wiley & Sons, New York. 498 pp.
- Carter M.R. y B.C. Ball (1993). Soil Porosity. En: M.R. Carter (ed.). Soil Sampling and Methods of Analysis. Can. Soc. Soil Sci. Florida, USA. Pp. 581-588.
- Dewis J. y F. Freitas (1970). Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N°10. FAO. Roma. 36-57 pp.
- Escobar, E.H.; H.D. Ligier; R. Melgar; H. Matteio y O. Vallejos (1996). Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes 1:500.000. Ediciones INTA. EEA Corrientes. Argentina, 430 pp.
- FAO (2019). (09 de Marzo de 2023). Escasez de agua: Uno de los mayores retos de nuestro tiempo. <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/#:~:text=El%20agua%20es%20esencial%20para,y%20nutricional%20presente%20y%20futura.>
- Forsythe, W. (1975). Física de Suelos: Manual de Laboratorio. Serie de libros y materiales educativos IICA; no. 25. IICA 1985, c1975. San José, Costa Rica. 212 pp.
- Galindo Araque, D., Vargas Sarmiento, M., & Corredor Gómez, J. (2017). Caracterización de Temperatura y Humedad de Suelos Agrícolas. Letras ConCiencia TecnoLógica, (16). Colombia. Pp 24-31.
- Gavande S.A. (1972). Física de suelos: principios y aplicaciones. Editorial Limusa. Texas, USA. Pp 351.
- Hansen G. (2015). Determinación de humedad gravimétrica de suelos. Su correlación con sensores de humedad. Argentina. 4pp.
- Ledesma, Lino Luis. (Marzo 1981). Los suelos del departamento Quitilipi. INTA. EEAA Saenz Peña, Chaco. Argentina. 235pp
- Ledesma, Lino Luis y Zurita, Juan José (2004). Los suelos del departamento 9 de Julio. Ediciones INTA. EEAA Saenz Peña, Chaco. Argentina. 230pp

- Martínez Fernández, J. y A. Ceballos Barbancho (2001). DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA SONDA TDR PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO. Temas de Investigación en Zona no Saturada. Eds. J. J. López, M. Quemada. La Rioja, España. 7 pp.
- Ministerio de producción y trabajo de la Nación. (Agosto 2019). Plan de Gestión Integrada de Riesgos Agropecuarios de la Provincia del Chaco. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/girsar_-_chaco_-_ppgira_ago19_compressed.pdf
- Montenegro González, H., Malagón Castro D. y L. Guerrero. (1990). Propiedades Física de los suelos. Subdirección Agrológica. I.G.A.C. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Bogotá. Colombia. 813 p.
- Naranjo, M. E., & Ataroff, M. (2015). Calibración de equipos TDR para su uso en suelos no disturbados. *Interciencia*, 40(6). Caracas, Venezuela. Pp 416-422.
- Nelson, D.W. & L.E. Sommers (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In J.M. Bingham (Ed.). *Methods of soil analysis Part 3. Chemical Methods*. ASA and SSSA, Madison, WI. p. 961-1010.
- Porta Casanellas J. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa Libros. 3ra ed. España. 929 pp.
- Quiroga, A. (2011). El manejo del agua y la fertilidad en la región semiárida pampeana. *Revista Fertilizar*, N°20, Agosto 2011. 22-29.
- Sebastián A. TorrellaI y Jorge AdámoliII. (2006). SITUACIÓN AMBIENTAL DE LA ECORREGIÓN DEL CHACO SECO. En Brown, A., U. Martinez Ortiz, M. Acerbi y J. Corcuera (Eds.). (2006). *La Situación Ambiental Argentina 2005*, Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires. 582pp.
- Soil Survey Staff (2014). *Claves para la taxonomía de suelos*. 12va ed. 399pp.
- Steel, R.G.D. y J.H. Torrie. (1993). *Bioestadística. Principios y Procedimientos*. 2da ed. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A., 622 pp.
- Torrente, O. (2013). *Arduino. Curso práctico de formación*. México DF, México. Alfaomega 588 p.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Chip:** Placa de material semiconductor que incorpora un circuito electrónico que contiene componentes electrónicos microscópicos que transmiten señales de datos y permiten realizar numerosas funciones en computadoras y dispositivos electrónicos.
- **Display:** Pantalla donde se muestra visualmente cierta información.
- **Jumper:** Cable o elemento que permite cerrar el circuito eléctrico del que forma parte dos conexiones.
- **Open Source:** Código diseñado de manera que sea accesible al público: todos pueden ver, modificar y distribuir el código de la forma que consideren conveniente.
- **Potenciómetro:** Resistor eléctrico con un valor de resistencia variable y ajustable manualmente que permite controlar la intensidad de corriente a lo largo de un circuito conectándolo en paralelo o la caída de tensión al conectarlo en serie.
- **Time Domain Reflectometry (TDR):** Sonda que realiza lecturas basadas en la permitividad del medio, proporcionando rápidos registros de humedad y permitiendo realizar mediciones en una gran cantidad de terreno en poco tiempo.