

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DE SUELOS

IRWIN FABIAN CARO CARDONA

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SECCIONAL MEDELLÍN

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MEDELLIN

2014

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL
PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DE SUELOS

IRWIN FABIAN CARO CARDONA

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Asesor

Éver Alberto Velásquez Sierra, Ph. D.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SECCIONAL MEDELLÍN

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MEDELLIN

2014

Tabla de contenido

RESUMEN	7
1. PRESENTACIÓN GENERAL DE PROYECTO.....	8
1.1. OBJETIVOS.....	8
1.1.1. Objetivo General	8
1.1.2. Objetivos Específicos.....	8
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	9
1.2.1. Descripción de la propuesta	9
1.2.2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación en términos de necesidades y pertinencia.....	9
1.2.3. Propósito del proyecto de grado	11
1.3. ESTADO DEL ARTE	13
1.4. MARCO TEORICO	17
1.4.1. El suelo	17
1.4.2. Métodos para estimar humedad de suelos	20
2. DESARROLLO	25
2.1. DETERMINAMINACIÓN DEL TIPO DE SENSOR DE HUMEDAD.....	25
2.1.1 Ec-5 Sensor de humedad de suelos	25
2.1.2 10 Hs Sensor de humedad de suelos	25
2.1.3 Sensor de humedad de suelos SEN 0114.....	25
2.1.4 Sensor de humedad de suelos SEN92355P.....	25
2.2. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO	28
2.2.1. Microcontrolador Arduino UNO	29
2.2.2. 4Display-Shield-144	30
2.2.3. Batería 9v	32
2.2.4. Módulo de tarjeta Micro Sd.....	32
2.2.5. Software	32
2.3.2 Diseño del encapsulado	37
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR	38

2.3.1 Descripción experimental	38
2.3.2 Tratamiento estadístico de los datos.....	39
3. RESULTADOS	44
4. CONCLUSIONES.....	50
ANEXO 1	51
Bibliografía	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases del Proyecto	12
Figura 2. Capas del suelo	18
Figura 3. Niveles de humedad de suelo	20
Figura 4. Sonda de neutrones (U, 2003).....	22
Figura 5. Sensor de humedad de resistencia eléctrica.....	24
Figura 6. Sensor de humedad Capacitivo (H. Fernández, 2009).....	24
Figura 7. Diagrama esquemático del Sensor de humedad de suelo	28
Figura 8. Placa de desarrollo Arduino UNO	30
Figura 9. Shield uLCD144.....	31
Figura 10 Diagrama de flujo correspondiente al software programado	33
Figura 11. Definición de funciones.....	34
Figura 12. Definición de comunicación serial	34
Figura 13. Impresión de pantalla 1	35
Figura 14. Impresión de pantalla 2.....	36
Figura 15. Captura y escalización.....	36
Figura 16. Toma de datos con el dispositivo	39
Figura 17. Datos de porcentaje de humedad correspondientes medida gravimétrica de 5.8%.	40
Figura 18. Datos de porcentaje de humedad correspondientes medida gravimétrica de 31.05%.	41
Figura 19. Distribución normal para un rango entre 41 – 47	43
Figura 20. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 1	45
Figura 21. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 2	46
Figura 22. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 3	48
Figura 23. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 4	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del suelo según su diámetro promedio de grano (Cardona, 2008)	18
Tabla 2. Determinación de humedad por medio del tacto (I. Carlos, Virtual unal, 2008)	23
Tabla 3. Características de sensores de humedad comerciales	26
Tabla 4. Características del microcontrolador Arduino UNO	29
Tabla 5. Ficha técnica uLCD144	31
Tabla 6. Ficha técnica batería de 9v	32
Tabla 7. Ficha técnica modulo	32
Tabla 8. Estadística descriptiva correspondientes medida gravimétrica de 5.8%	41
Tabla 9. Estadística descriptiva para rango entre 27 – 33	42
Tabla 10. Estadística descriptiva para rango entre 41 – 47	43
Tabla 11. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 1	45
Tabla 12. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 2	46
Tabla 13. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 3	47
Tabla 14. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 4	48

RESUMEN

En el presente informe se describe el desarrollo realizado como trabajo de grado en el cual se construyó en un prototipo de dispositivo portátil adecuadamente caracterizado, que permite medir valores de humedad en diferentes tipos de suelo con fines de enseñanza y uso en aplicaciones de medio ambiente. El prototipo integra un sensor de humedad con una tarjeta de desarrollo para la captura de datos; se integró al dispositivo una pantalla acoplada a la tarjeta de desarrollo que permite utilizar las funciones de la tarjeta desde la pantalla, logrando características como disminución del tamaño, versatilidad, portabilidad, ahorro de energía e implementaciones de circuitos adicionales. Además el dispositivo permite almacenar los datos obtenidos en una memoria. Con fines de su adecuada caracterización se realizaron las pruebas de las capturas de datos en ambientes controlados, verificando que los datos obtenidos cumplan con los requerimientos estadísticos que garanticen su buen funcionamiento, así como la comparación con otros dispositivos con el fin de calibrar, el desarrollo de este proyecto contribuye a determinar tiempo de vida útil del sensor, margen de error y validar la utilidad del dispositivo.

Con esta idea de proyecto y por medio de la Ingeniería Electrónica se pretende contribuir, por un lado la implementación equipos de los laboratorio en programas como Ingeniería Ambiental, y por otro lado aportar al desarrollo y consolidación del semillero de instrumentación y ciencias básicas de la Universidad de San Buenaventura.

1. PRESENTACIÓN GENERAL DE PROYECTO

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Construir y caracterizar un dispositivo portátil, que permita la captura y almacenamiento de datos de humedad de suelo, para realizar un monitoreo periódico de los cambios de humedad en muestras de laboratorio o terrenos en los que se requiera conocer el estado de estos; de modo que se pueda determinar correctamente la humedad del suelo por medio del dispositivo electrónico.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar el tipo de sensor de humedad a utilizar en el dispositivo con el fin de conocer el tiempo estimado de vida útil y margen de error con el paso del tiempo, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo.
- Desarrollar en una tarjeta de desarrollo un software, para la administración de información capturada desde el sensor análogo, diseñando una interfaz máquina-usuario, que permita la manipulación del dispositivo desde un mini – joystick.
- Realizar la caracterización del sensor por medio de la estadística descriptiva, para validar la captura datos, estabilidad estadística y fidelidad de medida en comparación con otros equipos que cumplen la misma función.
- Diseñar e implementar un prototipo con cubierta exterior que permita integrar el dispositivo completo, permitiéndole al usuario mover y transportar de un lugar a otro el dispositivo con facilidad.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.2.1. Descripción de la propuesta

Esta propuesta de proyecto de grado se inició con el interés de construir y caracterizar un dispositivo, que tuviera la capacidad de capturar y almacenar datos de humedad de suelo por medio de un sensor con el fin de realizar un monitoreo periódico de los cambios de humedad en muestras de laboratorio o terrenos a campo abierto.

Se requirió verificar que los datos obtenidos cumplieran con los requerimientos estadísticos que garantizaran su buen funcionamiento, se realizaron pruebas de calibración del dispositivo con un estándar y con otro tipo de dispositivo existente en el mercado. Entre las aplicaciones del dispositivo se va a medir la humedad de suelo en diferentes tipos de muestras como cultivos de invernadero, mantenimiento de terrenos, canchas de fútbol y jardines. El dispositivo tiene fines educativos como parte de la dotación de instrumentos en los laboratorios de Ingeniería Ambiental.

1.2.2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación en términos de necesidades y pertinencia.

Conocer el estado del suelo en términos de humedad ha sido una necesidad mundial desde que se realizan construcciones, cultivos y sostenimientos de áreas verdes. En la actualidad es de vital importancia para el sector agropecuario conocer el estado de la humedad del suelo donde están sembrados sus cultivos, día a día se presentan situaciones en la academia donde es necesario tener estandarizados los métodos con los cuales se miden cambios en zonas afectadas por exceso o ausencia de humedad.

El uso de dispositivos asociados a la medición de humedad en suelos se está planteando como una nueva solución para el ahorro de recursos no renovables como el agua, (Felipe, Eva, & Celsa, 2007) estudios realizados en cultivos de fresa, dan como resultado que los riegos no deben realizarse diariamente ya que no tienen ningún efecto sobre el cultivo, se determinó que las variaciones de crecimiento o decrecimiento se da en periodos semanales, es decir al no realizar riegos diarios los cultivos utilizan las reservas de agua del suelo hasta agotar la de los niveles inferiores, esto permite deducir que el suelo tiene una buena capacidad de retener agua y que hay margen de reservas de agua en el suelo.

Este tipo de estudios revela la importancia de conocer la humedad de suelo desde el campo agrícola. La ausencia de humedad y la errática irrigación de cultivos son la principal causa de la baja producción y de los fracasos en la agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008), la no optimización del flujo de agua a través del suelo en zonas de producción provocan bajos rendimientos asociados a la humedad del suelo.

Entre los campos de acción de los dispositivos que miden humedad, se puede hablar de la jardinería (Césped Group , 2009) muchas veces mal atendida debido al desconocimiento de tipo de suelo al cual se le está haciendo mantenimiento, existen varias clases de céspedes que presentan diferentes necesidades de irrigación, por lo cual se hace necesario el uso de dispositivos que permitan conocer el estado del césped al momento de hacer riegos. La ausencia de riego en césped evita la recuperación por pisadas quedando huellas marcadas en él, el crecimiento se da de manera más lenta y comienza a tornarse de un color amarillento. El exceso de irrigación provoca la aparición de hongos, compacta el suelo y evita que el césped capture eficientemente los nutrientes evitando su crecimiento.

Existen medidores de humedad de suelos análogos y digitales en el mercado, los medidores análogos presentan una ventaja de tipo económica debido a su bajo costo y además su funcionamiento no depende de baterías, pero presentan desventajas de mantenimiento ya que las sondas (sensores) que realizan la medición de humedad son irremplazables, lo que obliga al consumidor a desechar el dispositivo, por otro lado la visualización del valor de la lectura entregada por medio del indicador del dispositivo se convierte en un dato subjetivo dejando el valor de la medición a interpretación del usuario, lo que hace importante los dispositivos que entregan el valor de la medición digitalmente; este tipo de dispositivo ofrece al usuario mayor certeza sobre el dato obtenido debido a que el dato es un valor fijo y visualizado a través una pantalla a color o un LCD (Liquid Crystal Display), se debe tener en cuenta que este tipo de medidores tienen la tendencia de ser más costoso debido a que ofrecen la facilidad de visualizar datos aunque sus mediciones se realicen análogamente.

Teniendo en cuenta la importancia en la actualidad de la medición de humedad de suelos, se desarrolló un prototipo de un dispositivo digital que ofrece las mejores características de los medidores análogos y digitales existentes; entregando al usuario un dispositivo que trabaja con un sensor de humedad de bajo costo, reemplazable y caracterizado a través de pruebas que simularon su desempeño y determinaron un estimado de vida útil recomendado.

Entre los usuarios que requieren hacer mediciones de humedad de suelos se encuentra la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, específicamente el programa de Ingeniería Ambiental quien por medio de su director de programa Hernán Alejandro Acosta manifestaron la necesidad de adquirir un dispositivo que les permita conocer con exactitud el valor de la humedad del suelo; actualmente este tipo de pruebas se realizan manualmente en salidas de campo y el dictamen de humedad en suelo se realiza por la sensación de humedad en la mano, lo que hace que el valor de humedad se vuelva un dato subjetivo; en laboratorio la medición se realiza de la siguiente manera, se pesa la muestra húmeda, luego esta se coloca en un horno de secado durante 24 horas, finalmente la muestra seca es pesada y la diferencia de peso entre los dos estados de la muestra determinan el porcentaje de humedad presente. Con el desarrollo de este dispositivo se pretende brindar a los estudiantes de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín un instrumento confiable con el cual se puedan realizar prácticas de laboratorios y salidas de campo.

1.2.3. Propósito del proyecto de grado

Este proyecto de grado busca desarrollar un prototipo de un dispositivo portátil que permita capturar y almacenar datos de humedad tomados en diferentes periodos de tiempo, para esto se utilizará un sensor análogo de bajo costo el cual estará caracterizado de forma que garantice al usuario la exactitud en la medición, que se pueda establecer el margen de error en la medida y determinar aproximadamente un rango de vida útil del sensor. Con este desarrollo se quiere cumplir con el enfoque del semillero de ciencias básicas e instrumentación (Facultad de Ingenierías) de dotar los laboratorios con instrumentos de medición.

Para la realización de este proyecto se hizo un planeamiento de cinco fases como se muestra en la figura 1, con el fin de que cada una de ellas se fuera desarrollando de manera organizada, planificada y así cumplir los objetivos previamente planteados.

Fase 1: Determinar el tipo de sensor de bajo costo que supla las necesidades requeridas por el proyecto.

Fase 2: Desarrollar un software para capturar y escalar los datos obtenidos por el sensor de humedad de suelo a través de un puerto análogo.

Fase 3: Diseñar e implementar una interfaz basada en el usuario, que permita desarrollar un manejo intuitivo del dispositivo.

Fase 4: Caracterizar el sensor de humedad por medio de pruebas en ambientes controlados para obtener información acerca de la exactitud de la medida entregada por el sensor, determinar margen de error y comparar las mediciones obtenidas con un dispositivo ya existente que realice la misma función.

Fase 5: Diseñar e implementar el encapsulado del dispositivo que permita el fácil uso y desplazamiento.

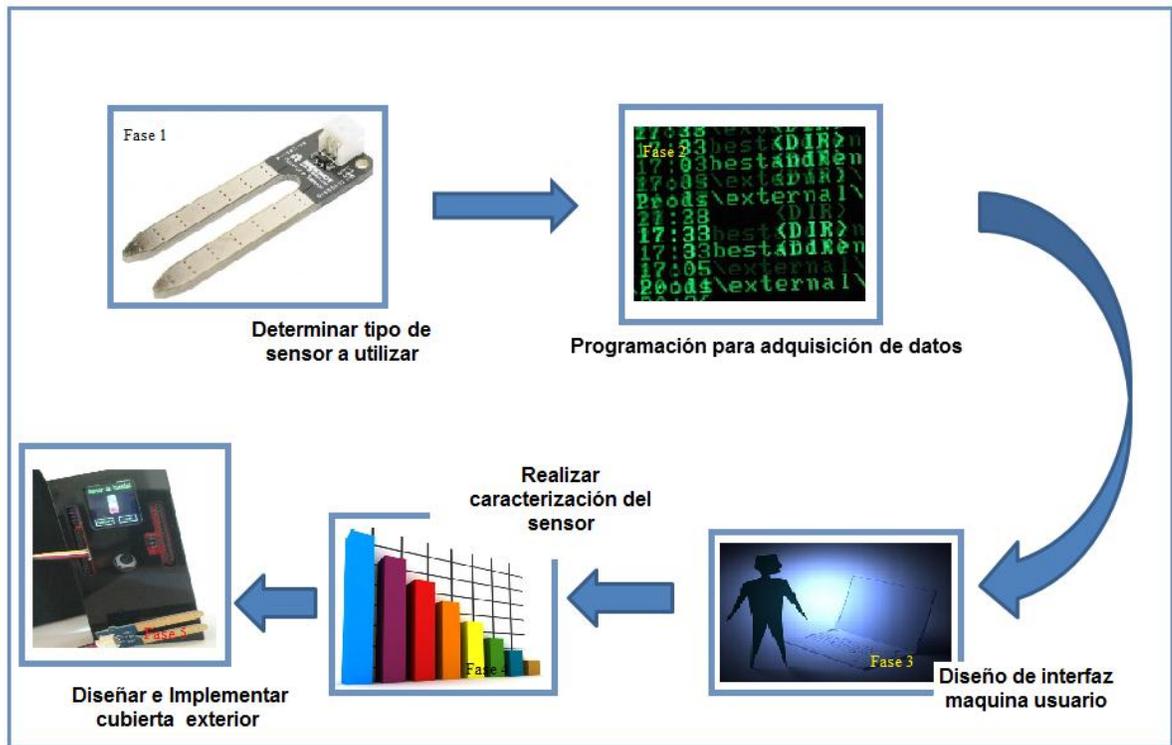


Figura 1. Fases del Proyecto

1.3. ESTADO DEL ARTE

Realizar mediciones periódicas que permitan conocer y llevar registro de los cambios de humedad presentes en el suelo es de gran importancia para el control de cultivos, la gestión de riesgo de deslizamientos y en general para estudio de las características del suelo, ya que en muchos casos es un factor clave para la toma de decisiones. Debido a los fenómenos actuales de cambios de clima, las condiciones atmosféricas sufren variaciones inesperadas convirtiendo el suelo en un factor variante y dependiente de las condiciones climáticas; además fenómenos como el calentamiento global hacen que la predicción de estaciones se vuelva inexacta y cambiante en el tiempo. Como consecuencia a dichos fenómenos el principal afectado es el sector agrícola, dado que en muchos casos los efectos asociados a la humedad excesiva del suelo producen pérdidas notables en la economía de los países (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2010); solo en Estados Unidos éstas sumarían tres mil millones de dólares, adicional al riesgo de erosión del suelo y al aumento de salinización del suelo en regiones secas.

Todos estos elementos que producen cambios de clima hace necesario implementar en el sector agrícola sistemas que tengan registro de humedad, de tal manera que se pueda conocer el estado del suelo en tiempo real. Esto da origen a investigaciones que permiten conocer el aprovechamiento de agua en cultivos de manera periódica, creando planes de irrigación dependiendo de las necesidades del suelo, lo que se traduce en un uso eficiente al agua. Estas afirmaciones se basan en un estudio realizado en cultivos de fresas en la ciudad de Madrid, España, en el cual se concluye que la manera más eficiente de que las personas encargadas de cultivos puedan asegurar un uso eficiente del agua, es mediante la implementación de sensores de humedad de suelo, de otra forma es imposible detectar la el estado de la humedad en el mismo. (Fuentelzas, Hernandez, & Peitado, 2007)

Como se puede ver, existe una gran motivación para el desarrollo de dispositivos, construcción de sensores e implementación de metodologías con las cuales se pueda medir la humedad en los suelos. En este aspecto se puede mencionar el diseño y construcción de un sensor capacitivo de bajo costo, desarrollado por (Kandala, Nat. Peanut Res. Lab., & Butts, 2008). Este sensor presenta resultados equivalentes a los obtenidos por instrumentos de medición de humedad comerciales, sin embargo permite conocer la humedad de la muestra sin destruirla, lo que ha servido para medir la humedad en cacahuates y que también sirve en suelos con características especiales.

Por otro lado, es importante tener en cuenta el auge que han tenido la utilización de sensores remotos para la medición de variables ambientales y en especial para la medición de la humedad (Evelt, Heng, Moutonnet, & Nguyen, 2008). En una de estas interesantes implementaciones se construyen redes de sensores comunicados inalámbricamente para el riego de jardines, de tal manera que la información de los sensores se envía a un coordinador quien se encarga de tomar las decisiones para el riego y mantenimiento de jardines (Salazar, 2013).

Otra variante de la medición por sensores remotos se ha realizado utilizando dispositivos que por medio de señales de infrarrojo realizan la medición de la humedad (Dias, Roque, Ferreira, & Dias, 2013). En este caso se emiten ondas con longitud de onda conocida las cuales se refractan por el medio (vegetación, suelos, etc) y dependiendo de la respuesta de la onda reflejada se puede determinar el estado de humedad de los tallos y las hojas.

Durante los últimos años se han utilizado diferentes métodos y tipos de sensores para determinar la humedad de suelos, dentro de los cuales la medición por medio de sensores resistivos es una de las maneras más destacadas por su sensibilidad e interés desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas y de los materiales utilizados (Hymeret, Moran, & Keefer, 2000) (Zhou, Shimada, & A, 2001) (Zhu, Kang, & Y, 2007). En este contexto, en Italia se realizó un estudio para verificar la eficacia de medir la humedad en los suelos por medio de la resistencia eléctrica, por un lado probando la bondad de la utilización de este tipo de sensores, y por otro lado determinando el comportamiento estadístico de los datos obtenidos. Otros autores resaltan la importancia de medir la humedad en el suelo por medio de la resistividad eléctrica (Friedman, 2005) (Lapenna, y otros, 2005) (Samouelian, Cousin, Tabbagh, Bruand, & Richard, 2005) en donde se determinó la relación entre la resistividad y la humedad del suelo en zonas no saturadas (Walker & P, 2002) (Michot, y otros, 2003). Este estudio inició realizando pruebas en 8 sitios diferentes utilizando un sensor resistivo y una sonda calibrada TDR (Time Domain Reflectometry) para comparar las mediciones punto a punto. Después de tener los datos, se realizaron análisis descriptivo por medio de resúmenes invariantes estándar. Aunque el método elegido en este estudio ofrece menor sensibilidad en la medida también presenta errores graves debidos a la variabilidad del sensor y no tiene requisitos en la distribución estadística de los datos. Es importante mencionar que para lograr una asociación entre la humedad de suelo y resistividad se realizaron análisis estadísticos con el fin de evaluar el coeficiente de correlación de Person (r), el cual se puede aplicar en variables continuas caracterizadas por tener una distribución normal y una homogeneidad en la varianza. En ambos casos se aplicaron pruebas de chi-cuadrado de Pearson y un

análisis gráfico, pruebas que le aportan fuertemente a la bondad de la medición de la humedad y que no es muy usual en los trabajos desarrollados por la mayoría de autores, muchos de los cuales utilizan, sin ninguna prueba, las distribuciones normales para el comportamiento de sus datos (G, y otros, 2012).

Con el estudio de correlación de Pearson r , los autores pudieron mostrar que para los sensores resistivos los datos de humedad del suelo presentaban variaciones en rangos limitados y las relaciones lineales no eran apropiadas debido a su variabilidad, sin embargo los autores sugieren que no hay razones con la suficiente validez para descartar el modelo lineal y adoptar uno más complejo. Incluso con las variaciones obtenidas las mediciones de resistividad pueden considerarse bastante confiables para la estimación de la humedad del suelo (Michot, y otros, 2003).

(G, y otros, 2012) Concluye que los sensores resistivos son adecuados para realizar mediciones de humedad, además en su investigación obtiene como resultado que al realizar comparaciones con las mediciones obtenidas con el método de la TDR (Time Domain Reflectometry) obtuvo que los datos del método TDR presentan menor variabilidad que la resistividad. Se deben tener en cuenta que para realizar mediciones con sensores resistivos existen ciertas consideraciones como el rango de operación y limitaciones frente a tipos de suelos arcillosos y limosos, esto debido a la gran cantidad de agua que almacenan, lo cual implica que los sensores se saturaran inmediatamente (Friedman, 2005) (Lapenna, y otros, 2005).

Una revisión crítica a las técnicas para realizar mediciones de humedad de suelo fue realizada por (Susha, D.N, & Maryam, 2014), en donde se describen claramente dichas técnicas para estimar el valor de humedad en suelos. Dentro de las técnicas descritas es importante mencionar una manera particular de medir la humedad a través de la medición de la resistividad entre los electrodos en el suelo o utilizando la resistividad de un material que esté en equilibrio con el suelo (D.A, C.S, J.W, B.K, & S.B., 2008). En este caso se menciona que la estimación de potencial matricial es uno de los métodos más comunes de medir humedad, en la cual se entierran dos bloques porosos (construidos de yeso, fibra de vidrio y cerámica) y en su interior se tienen dos electrodos conectados a un recolector de datos los cuales se encargan de realizar las medidas de resistividad. Las medidas se realizan después de un tiempo en el cual se considere que la humedad se moverá dentro o fuera del bloque hasta que el potencial matricial del bloque y el suelo sean los mismos. Esta manera de medir la humedad es adecuada para tipos de suelos de textura fina y no para suelo de textura gruesa, ya que los bloques de

yeso no son sensibles por debajo de 1 atmosfera Adicionalmente se muestra la limitación del método para suelos salinos (F.S & J. Xin, 1994) y en valores cercanos a la saturación dado que la resistividad eléctrica de los suelos disminuye exponencialmente con el aumento de la saturación (Fukue, Minato, Horibe, & Taya, 1999).

Es mucha la información que se puede encontrar respecto al uso de la resistividad para estimar la humedad de suelo, cada uno de los documentos aporta información sobre el desempeño que ofrece este tipo de sensores en diferentes tipos de suelos y temperaturas. Lo que hace posible que se realice un trabajo sustentado en experiencias y desarrollos realizados anteriormente dando como resultado un dispositivo portátil, fácil de manipular, que permita el almacenamiento de datos y permita medir la humedad en suelos.

1.4. MARCO TEORICO

Para iniciar el desarrollo de este proyecto es necesario contextualizar acerca de los conceptos básicos del suelo, humedad y los elementos electrónicos que son necesarios para construir el prototipo del dispositivo portátil que mide la humedad en suelos.

1.4.1. El suelo

Es la capa superior de la corteza terrestre, está formado a partir de la mezcla de minerales meteorizados y materia orgánica en descomposición. El proceso de formación del suelo se genera a través de la división de rocas en partículas de menor tamaño, estas se mezclan con materia orgánica en descomposición generando superficies blandas, fértiles y útiles para el sostenimiento de la vida actual.

El suelo (Fuentelzas, Hernandez, & Peitado, 2007) está constituido por cinco capas mostradas en la figura 2, las cuales se conocen como horizontes, se denominan así debido a que la corteza terrestre está dividida de forma horizontal.

La capa más externa es conocida como horizonte "O" o capa superior.

El horizonte A está formado por debajo del horizonte "O" esta capa se caracteriza por ser rica en materia orgánica y permitir el paso de agua hacia las raíces más profundas.

Horizonte B o zona de precipitado, se encuentra ubicado por debajo de los horizontes O, A y B se caracteriza por contener gran cantidad de minerales y materiales como arcilla, hierro, aluminio y material orgánico.

Horizonte C o subsuelo se caracteriza por su gran contenido rocoso, se reconoce por ser el apoyo de los horizontes superiores.

Horizonte D o R "Capa de roca endurecida" es el material rocoso subyacente que no ha sufrido ninguna alteración estas rocas pueden presentar fisuras pequeñas para permitir un desarrollo significativo de las raíces.

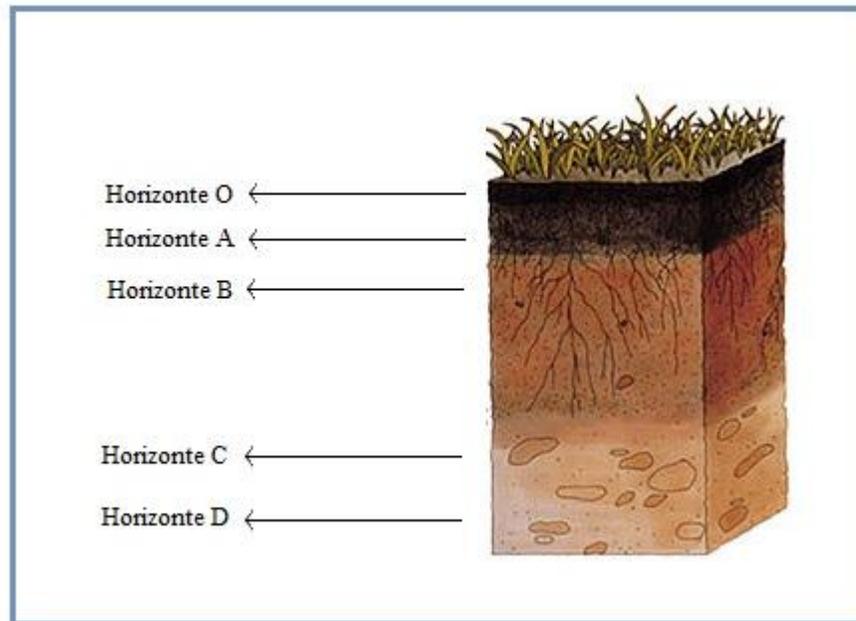


Figura 2. Capas del suelo

1.4.1.1. Composición del suelo

Se considera el suelo como un sistema heterogéneo y poroso, compuesto por millones de partículas que determinan el volumen del espacio poroso, en el cual se transmite o se retiene agua y aire. La distancia entre partículas se relaciona con el tamaño. En la tabla 1 se muestra la clasificación que tienen los suelos (Montenegro & H., 1990) dependiendo del diámetro promedio por partícula.

TIPO DE SUELO	DIÁMETRO DE GRANO (MM)
Arena muy gruesa	2.00 – 1.00
Arena gruesa	1.00 – 0.50
Arena media	0.50 – 0.25
Arena fina	0.25 -0.10
Arena muy fina	0.01 – 0.05
Limo	0.05- 0.002
Arcilla	Menores a 0.002

Tabla 1. Clasificación del suelo según su diámetro promedio de grano (Cardona & Zamora, 2008)

Los suelos que tienen un diámetro de grano mayor tienen menor porosidad que suelos con un diámetro de grano pequeño. Los poros es el lugar donde el agua se

almacena. El almacenamiento de agua en el suelo nos lleva al concepto en el cual se desarrolla este proyecto “La humedad”.

Se define la humedad como el contenido relativo de agua en el suelo. La humedad se puede expresar de varias maneras, relación de peso (gravimétrica), relación de volumen (volumétrica) o con relación al volumen de poros ocupados por agua (grado de saturación) (Foth, 1990).

1.4.1.2. Retención de agua en el suelo

La retención de agua o humedad en suelos se puede comparar con la retención de líquidos en una esponja, si se toma una esponja que está seca y se comienza agregar agua, ésta la absorberá lentamente. Al continuar agregándole agua, el líquido empezará a drenar libremente, al detener el proceso de agregar agua y dejar en reposo la esponja esta llegará a un momento en que dejará de drenar. Sin embargo, al aplicar presión sobre la esponja el agua drenará de nuevo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006).

Cuando se adiciona agua al suelo éste retendrá una cantidad de acuerdo con la capacidad de absorción que tenga el tipo de suelo, si la cantidad de agua adicionada supera la capacidad de retención el suelo, al igual que la esponja drenará. Cuando se deja de adicionar agua al suelo, este drenará por un periodo de tiempo hasta el punto en donde la fuerza con que está retenida el agua sea de determinada magnitud que no permita drenar libremente el agua.

La fuerza con la que el agua es retenida, es el producto de la atracción entre la superficie de las partículas del suelo y partículas de agua. La retención de agua en suelo depende de características de la fuerza superficial del agua del suelo. El ángulo de contacto entre el agua y las partículas de suelo son el mecanismo principal de retención de agua en los suelos livianos, intermedios y pesados.

El suelo presenta 3 niveles de humedad mostrados en la figura 3 (Ibañes, 2006), sus ubicaciones dependen de la composición y textura del suelo en la Figura 2 se muestra su distribución en suelos con características estándares.

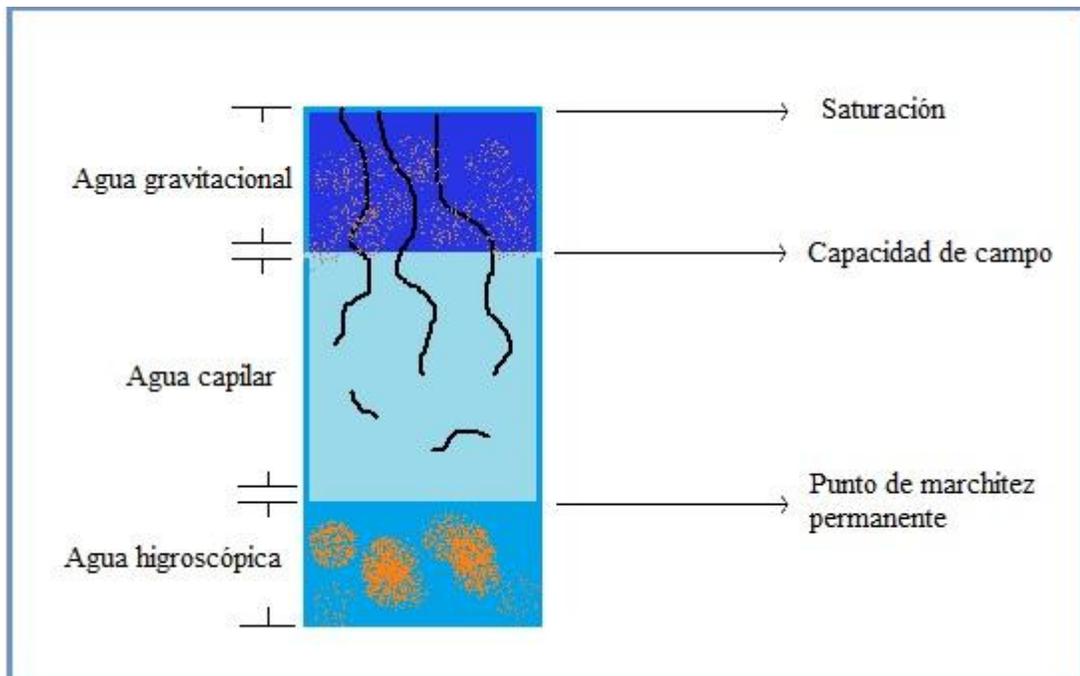


Figura 3. Niveles de humedad de suelo

Agua gravitacional: Es el líquido (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006) que drena debido a la gravedad a través del suelo y que está disponible para la nutrición de las plantas y otros organismos del suelo; fluye bajo la superficie terrestre hacia estanques, lagos y ríos.

Agua capilar: Es la fracción del agua que se encuentra ubicada en los microporos, Esta fracción del agua es utilizada por las plantas como reserva.

Agua higroscópica: Es la porción del agua en el suelo que no es utilizable por las plantas, esta agua absorbida directamente de la humedad del aire.

1.4.2. Métodos para estimar humedad de suelos

La necesidad de conocer el estado de humedad en los suelos hace que el hombre cree métodos para medir estas variables, todo inicia con métodos empíricos los cuales emplea variables como la diferencia de peso y sensación de humedad en la mano para dar dictámenes, con el paso del tiempo la tecnología es implementada en este tipo de mediciones, creando estándares y dando origen a gran variedad de dispositivos y tecnologías que se convierten en la herramienta principal para conocer la humedad en suelos (Carlos & González, 2009).

1.4.2.1. Métodos directos

Método gravimétrico

Es uno de los métodos más antiguos que existe para realizar mediciones de humedad en suelos, es considerado como el método tradicional y se clasifica en el método directo ya que se extraen muestras físicas del terreno donde se están realizando las mediciones.

El método gravimétrico (Reynolds, 1970) consiste en extraer varias muestras del terreno donde se está realizando la medición de humedad, estas muestras se pesan y se secan en un horno a 110° durante 24 horas o hasta que la muestra alcance un peso constante. (Se recomienda pesar el recipiente donde se va a secar la muestra para conocer el peso real de la muestra).

Para determinar el valor de humedad en la muestra se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_w = \frac{(M_h - M_s)}{M_h} * 100 \quad (1)$$

De la fórmula (1) sabemos que M_h es el peso de la muestra húmeda, M_s es el peso de la muestra seca y P_w = porcentaje de humedad por peso.

Aunque este método es el más utilizado, presenta más desventajas que ventajas al momento de hacer mediciones de humedad.

Como ventajas podemos destacar que es un método que presenta un bajo margen de error si se realiza con precisión y cuidado. Pero como desventajas podemos numerar:

Requiere de hornos que mantengan la temperatura constante y preferiblemente que sean temporizables.

Se deben realizar varias muestras debido a que la distribución del agua en el suelo no es homogénea.

El tiempo que demanda obtener los resultados. (24 horas)

Sonda de neutrones

Este método (Quintero & Ernesto, 2007) utiliza sondas que determinan el contenido de humedad del suelo, su representación física se muestra en la figura 4; por medio del frenado que experimentan las corrientes de neutrones al chocar con el hidrógeno del agua presente en el suelo. El proceso se desarrolla de la siguiente manera, la sonda emite un flujo de neutrones a determinada velocidad, estas al chocar con el hidrogeno del suelo generan energía cinética que se transforma en calor, cuando esto ocurre los neutrones se termalizan. Los neutrones termalizados son absorbidos por el detector, este realiza el procesamiento de la información y entrega el valor de humedad presente en el suelo. Como todos los métodos este también presenta características que se convierten en ventajas y desventajas.

Ventajas

- Método que entrega mediciones muy precisas.

Desventajas

- Alto costo del dispositivo.
- Necesita una calibración para cada tipo de suelo en el cual se utilice.
- Produce radiación.

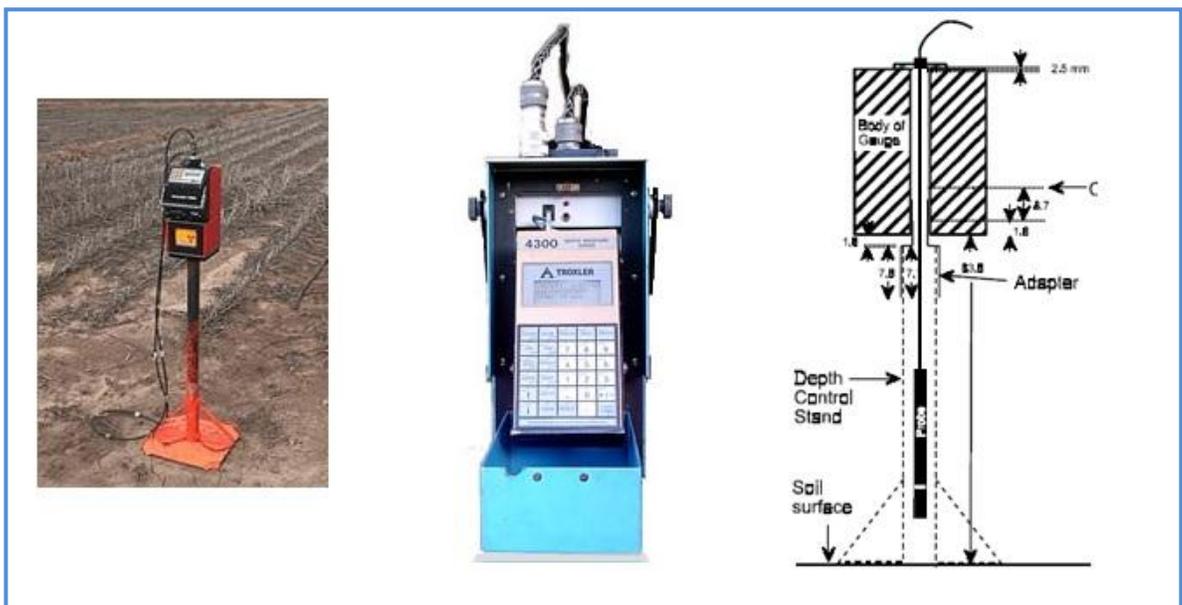


Figura 4. Sonda de neutrones (U, 2003)

Método del tacto

Este método es muy sencillo y práctico, se usa en salidas de campo cuando no se cuenta con dispositivos que realicen mediciones de humedad y su resultado está sujeto a la tabla 2. El método consiste en extraer muestras de suelo en diferentes profundidades. De 0.00 a 30.00 cm y 30.00 a 60.00 cm, cuando se tiene la muestra, se toman en la mano y se aprietan cada una de ellas hasta formar una bola; de acuerdo a su comportamiento se clasifica el grado de humedad.

GRADO DE HUMEDAD	TACTO	CONTENIDO DE HUMEDAD
Seco	Polvo seco.	Ninguna
Bajo	Se desmorona y no se aglutina.	25% o menos
Medio	Se desmorona pero se aglutina.	25% a 50%
Aceptable	Se forma bola y se aglutina con presión.	50% a 75%
Excelente	Se forma bola, se aglutina y es amasable.	75% a 100%
Húmedo	Chorrea agua cuando se aprieta	Sobre capacidad

Tabla 2. Determinación de humedad por medio del tacto (I. Carlos, Virtual unal, 2008)

1.4.2.2. Métodos indirectos

Sensor de resistencia eléctrica

El sensor mostrado en la figura 5, utiliza dos sondas para permitir el flujo de corriente a través del suelo, luego se lee la resistencia para obtener el nivel de humedad. Más agua hace que el suelo conduzca la electricidad con mayor facilidad (menos resistencia), mientras que el suelo seco es un mal conductor de la electricidad (más resistencia). Este tipo de sensores son económicos, simples y fáciles de usar.

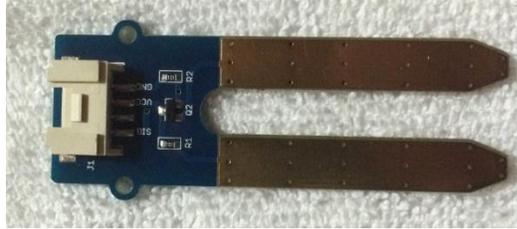


Figura 5. Sensor de humedad de resistencia eléctrica

Sensor capacitivo

En la figura 6 se observa un sensor que mide las variaciones de la constante dieléctrica del suelo, utiliza un capacitor que consta de dos sondas de un material conductor, a este sensor se le aplica un voltaje en un extremo, el material entre las sondas almacena una cantidad de voltaje. Un dispositivo captura el valor de voltaje almacenado entre las sondas.

Cuando el material presente entre las sondas es aire, el capacitor entregara un valor de 1 ya que este es la constante dieléctrica del aire. Con presencia de agua la medida entregada será más alta debido a que la constante dieléctrica del agua es mucho mayor. Como consecuencia, cuando se miden cambios de constante dieléctrica, el contenido de agua es medido indirectamente. (Kouro, 2001)



Figura 6. Sensor de humedad Capacitivo (Fernández & Lysbet, 2009)

2. DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto de grado se llevó a cabo de manera ordenada y planificada, dando cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos y tareas planteadas.

2.1. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE SENSOR DE HUMEDAD

En la información presentada en el marco teórico se nombraron los métodos para medir humedad en suelos, basados en el método indirecto se realizó una comparación de las diferentes características y costos que presenta cada uno de sensores existentes ofrecidos en internet.

2.1.1 Ec-5 Sensor de humedad de suelos

Este sensor determina el contenido volumétrico de agua en el suelo, midiendo la constante dieléctrica del medio a través de la capacitancia y la frecuencia. (Decagon Devices, Inc., 2007 - 2014)

2.1.2 10 Hs Sensor de humedad de suelos

Este sensor mide la constante dieléctrica del suelo con el fin de encontrar su contenido volumétrico de agua. Presenta una ventaja frente a otros sensores, su bajo consumo de potencia, además entrega mediciones de alta resolución. (Decagon Devices, Inc., 2007-2013)

2.1.3 Sensor de humedad de suelos SEN 0114

Es un sensor de baja tecnología, utiliza dos sondas para hacer fluir la corriente a través del suelo para luego medir el valor de su resistencia.

2.1.4 Sensor de humedad de suelos SEN92355P

Sensor de baja tecnología, sirve para detectar la humedad alrededor de los electrodos, es un sensor resistivo.

La tabla 3 es la comparación que se realiza a las principales características de cada uno de los sensores nombrados anteriormente:

REF	T.M	P.	VO.	SALIDA	TEM. T	RANGO	TAMAÑO	PRECIO
Ec-5	10 ms	±0,03	2,5V Dc a 3,6V Dc a 10mA	250 a 2500 mV	0-50 °C	0-100%	8,9 cm x 1,8 cm x 0,7 cm	
10 Hs	10ms	± 0.5 (10 a 50 % de humedad)	3V Dc a 12 mA 15V Dc a 15 mA	300 a 1250 mV (Independiente de voltaje de alimentación)	0-50 °C	0 - 57%	14.5cm x 3.3cm x 0.7cm	
SEN0114	-	-	3.3V Dc - 5v Dc 35mA	0 - 4.2V	0-40 °C	No especifica	7.5cm x 2.2cm x 0,7 cm	\$13.000
SEN92355P	-	-	3.3V Dc - 5v Dc 35mA	0 - 4.2V	0-40 °C	No especifica	6cm x 2cm x 0,7 cm	\$13.500

Tabla 3. Características de sensores de humedad comerciales

- T.M=** Tiempo de medición
- P=** Precisión
- Vo=** Voltaje de operación
- Tem. T=** Temperatura de trabajo
- Rango =** Rango de medición

Basados en la información anterior se puede determinar que el sensor Ec-5 cumple con los requerimientos de hardware que necesita el dispositivo, este sensor se destaca por su gran funcionalidad y versatilidad a la hora de hacer mediciones, pero se descarta, ya que es un sensor que ha sido caracterizado y todos sus parámetros han sido documentados.

Vale la pena resaltar que este proyecto basa su importancia en caracterizar un sensor de bajo costo, determinar características como exactitud, repetitividad, tiempo de respuesta, intervalos de operación. Por lo cual el sensor resistivo SEN92355P se acomoda a las necesidades requeridas por el proyecto, este tipo de sensores son desarrollados con el fin de realizar monitoreo en jardines, no existen estudios o trabajos serios sobre el desempeño del sensor a la hora de realizar mediciones, con el desarrollo de este proyecto se pretende realizar avances en este campo, realizando una documentación basada en pruebas y comparando resultados con métodos avalados por entes internacionales.

2.2. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

El desarrollo de este prototipo consta de un hardware y un software para su correcto funcionamiento. El hardware está compuesto por una placa de Arduino UNO, un Shield-uLCD144 el cual se acopla con los pines del Arduino UNO, el sensor de humedad, se conecta por medio de los pines de Vcc, Gnd, A0, el módulo MicroSd se conecta a través de los pines digitales (13, 12, 11, 7, Vcc, Gnd) La alimentación del dispositivo se realizara por medio de una batería de 9v la cual ira conectada a un regulador de voltaje (LM7805) y este a su vez alimentara el Arduino UNO.

A continuación se muestra la figura 7 que corresponde al esquema de conexión de los elementos nombrados anteriormente.

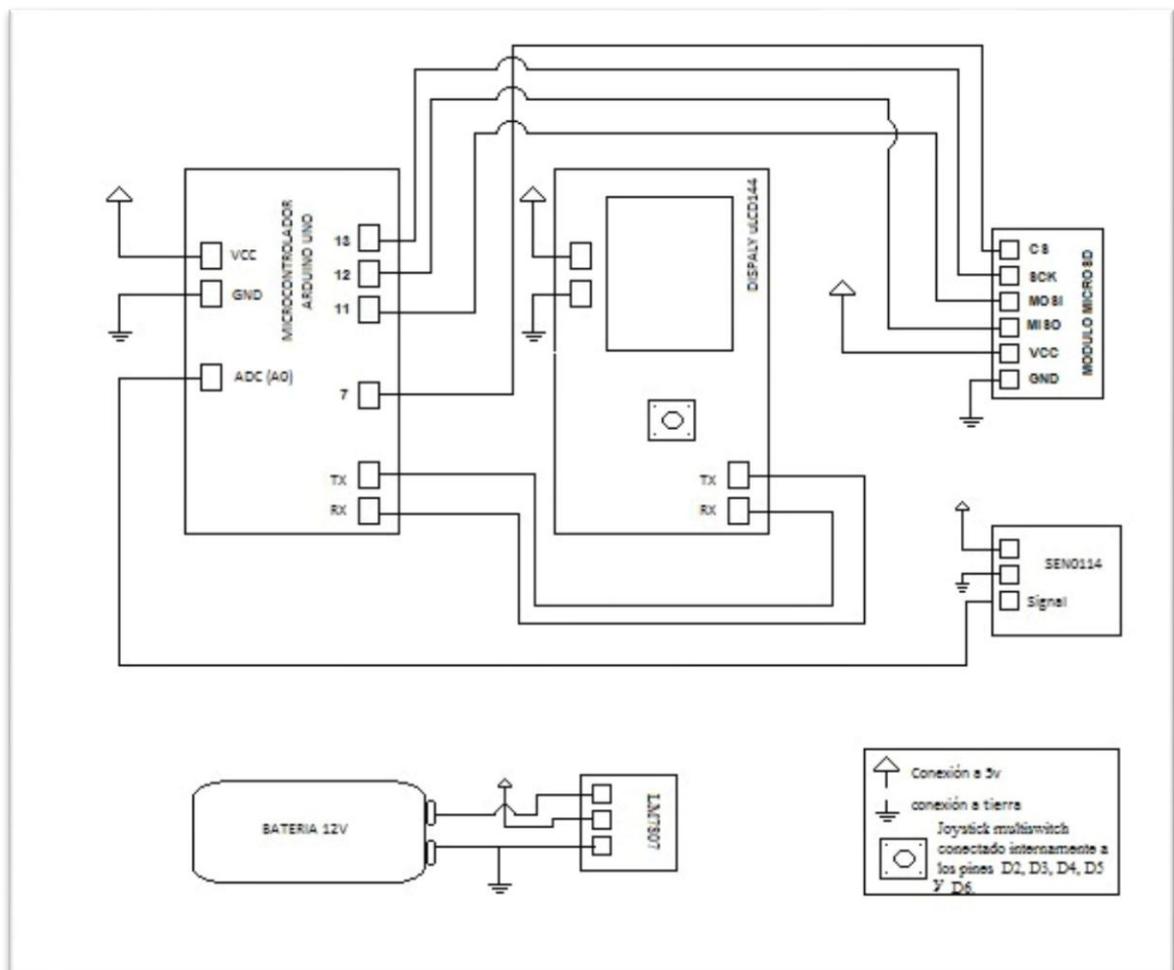


Figura 7. Diagrama esquemático del Sensor de humedad de suelo

2.2.1. Microcontrolador Arduino UNO

Arduino Uno es una placa electrónica, mostrada en la figura 8, (ARDUINO, 2011) basada en el microprocesador Atmega328. Cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio.

Los pines análogos A0 a A5, proporcionan 10 bits de resolución (1024 valores diferentes). Por defecto se miden 0 a 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando el pin AREF.

En la tabla 4 se muestran las características del Arduino UNO.

MICROCONTROLADOR	ATmega328
VOLTAJE DE OPERACIÓN	5V
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN (recomendado)	7-12V
LÍMITES DE VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	6-20V
I/O DIGITALES	14 Pines
CORRIENTE DC POR PIN I/O	Pin 40 mA
CORRIENTE DC A 3.3V	Pin 50 mA
PINES DE ENTRADA ANÁLOGA	6
MEMORIA FLASH	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
VELOCIDAD DE RELOJ	16 MHz

Tabla 4. Características del microcontrolador Arduino UNO

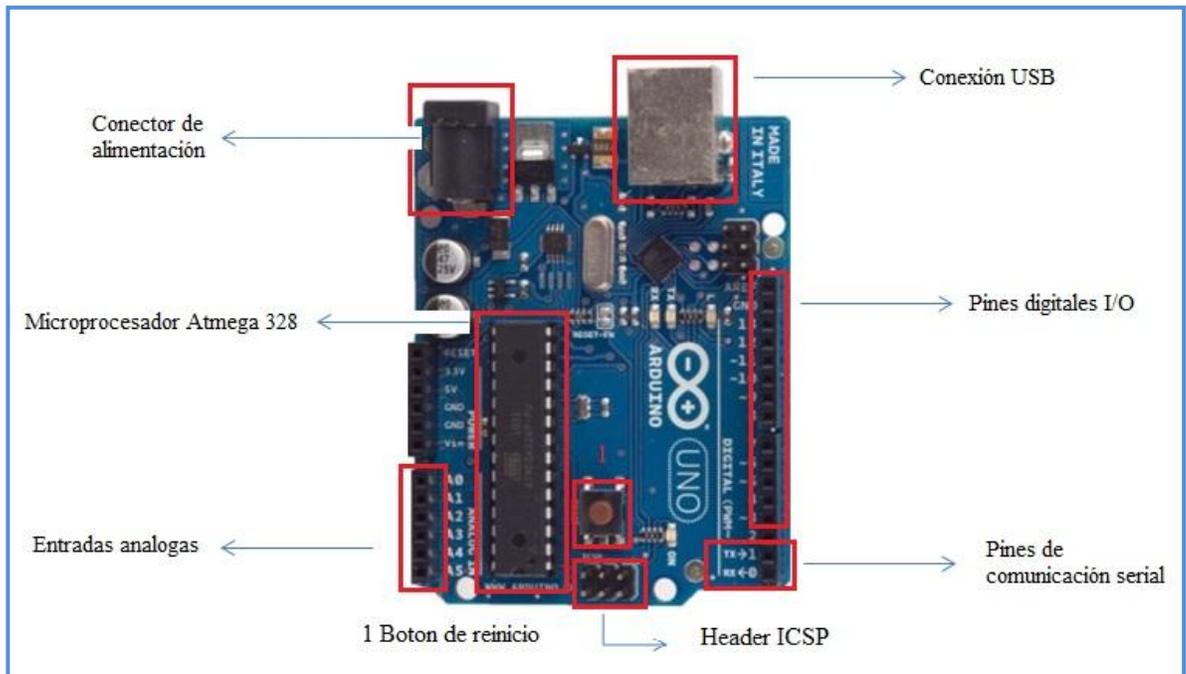


Figura 8. Placa de desarrollo Arduino UNO

2.2.2. 4Display-Shield-144

4Display-Shield-144 cuenta con un módulo uLCD-144-G2, en la figura 9 se observa el integrado que tiene un joystick multiswitch (4D Systems, 2010) de 5 posiciones y conectores macho que ayudan a conectar el 4Display-Shield para la placa de Arduino. El joystick de 5 de posiciones está conectado a los pines de Arduino D2, D3, D4, D5 y D6. La interfaz de comunicación entre el 4Display-Shield y Arduino es a través de la UART serie. Tanto las señales TX y RX están puenteados en el PCB escudo para que el Arduino UART puede ser liberado en marcha cuando se está programando.

A continuación en la tabla 5 se muestra la ficha técnica:

RESOLUCIÓN DE PANTALLA	128 x 128, 65 mil colores reales, pantalla LCD-TFT.
DIMENSIONES	1.44 " Tamaño diagonal, Área de la visión: 25.5mm x 26.5mm.
TIPO DE ILUMINACIÓN	Iluminación de fondo LED con más de 150 ° de ángulo de visión.
MEMORIA	Adaptador de tarjeta de memoria a bordo micro-SD para almacenar de iconos, imágenes, animaciones, etc Soporta estándar y de alta capacidad (HC-SD) las tarjetas de memoria.
DISPOSITIVO MULTIFUNCIÓN	5-Way interruptor multifunción Joystick conectado directamente a Arduino D2, D3, D4, D5 y D6 pasadores.

Tabla 5. Ficha técnica uLCD144

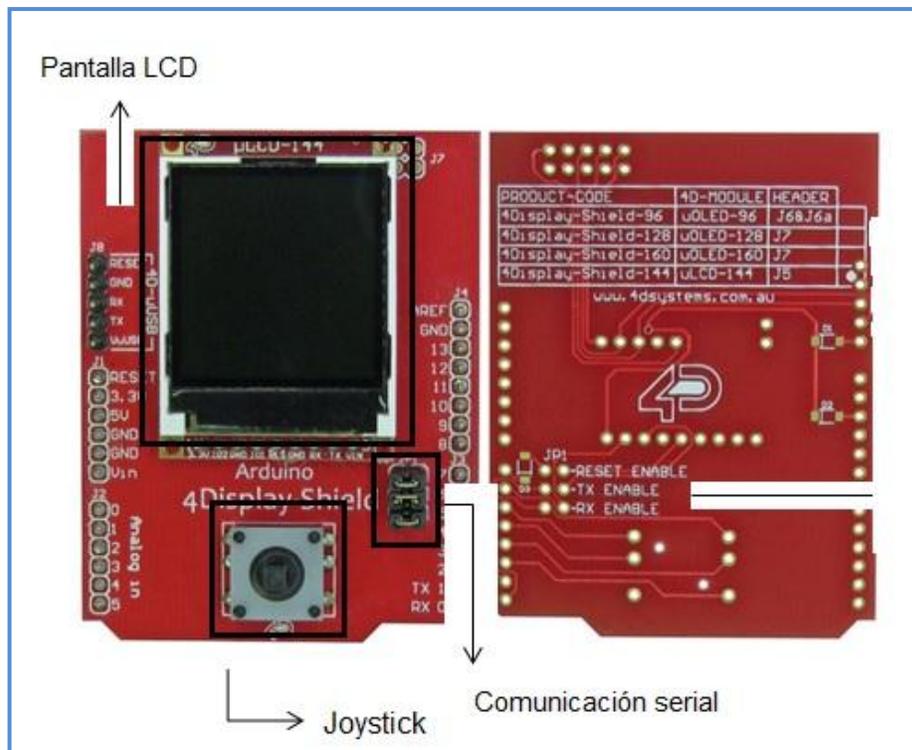


Figura 9. Shield uLCD144

2.2.3. Batería 9v

Este dispositivo utiliza una batería de 9v, en la tabla 6 se observan las características técnicas de la batería [4]:

Tensión nominal:	9V
Tensión de operación:	9,6 – 4,8 V
Denominación ANSI:	1604A
Denominación IEC:	6LR61
Capacidad:	565 mAh
Peso:	45 gramos
Volumen:	22,8 cm ³
Temperatura de operación:	20°C a 54°C
Conector:	PP3

Tabla 6. Ficha técnica batería de 9v

2.2.4. Módulo de tarjeta Micro Sd

Este dispositivo utiliza una de las tarjetas más pequeñas para el almacenamiento de datos, audio etc. Cuenta con una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface) que permite transmitir datos desde la placa ARDUINO UNO a la memoria por medio de una comunicación sincrónica.

Voltaje de operación	5v
Tamaño	20X28mm
Interfaz	SPI

Tabla 7. Ficha técnica modulo

2.2.5. Software

El software que permite el correcto funcionamiento del sensor de humedad de suelos es desarrollado en un lenguaje propio de ARDUINO, el cual está basado en C, es de libre adquisición y soporta todas las funciones del estándar C y algunas de C++.

Para el correcto funcionamiento del dispositivo se hace uso del puerto análogo (A0), se utilizan los pines Rx y Tx para hacer una comunicación utilizando el protocolo uart para la transferencia de información a la pantalla. A continuación se muestra el esquema del funcionamiento del programa.

En el diagrama de flujo se ve el paso a paso del funcionamiento del código, después de iniciar el programa realiza una serie de instrucciones mostradas en la figura 10, que se ha denominado definición de funciones.

```
#define DisplaySerial Serial

#ifdef LOG_MESSAGES
    #define HWLOGGING Serial
#else
    #define HWLOGGING if (1) {} else Serial
#endif

#include "Goldelox_Serial_4DLib.h"
#include "GoldeloxBigDemo.h"
#include "Goldelox_const4D.h"
```

Figura 11. Definición de funciones

En el segundo proceso, figura 11, se realiza la inicialización de la comunicación serial, la cual se va a realiza a 9600 baudios.

```
int i, rc ;
char wks[20] ;
char bufIntToChar[12]; //creat
Display.TimeLimit4D = 5000 ;

DisplaySerial.begin(9600) ;
```

Figura 12. Definición de comunicación serial

El dispositivo al realizar los 2 procesos anteriores, imprime por pantalla lo que se ha denominado como pantalla 1. Para realizar esta impresión es necesario definir la ubicación del texto e imágenes que se van a incluir, esta definición se observa en la figura 12.



Figura 13. Impresión de pantalla 1

Una vez el dispositivo se encuentra en este ciclo, estará a la espera de recibir una orden por medio del joystick, las opciones son oprimir hacia la derecha (un bajo por pin D4) o hacia la izquierda (un bajo por pin D3) todos los pines del joystick están conectados a las entradas digitales y están configurados en modo de PULLUP.

Se describirá el proceso si el joystick es oprimido hacia el lado **izquierdo**:

Cuando se selecciona este lado el código hará un salto hacia lo que se ha denominado pantalla 2, para realizar la impresión de esta opción de pantalla es necesario definir la ubicación del texto e imágenes que se van a incluir, esta definición se observa en la figura 13.

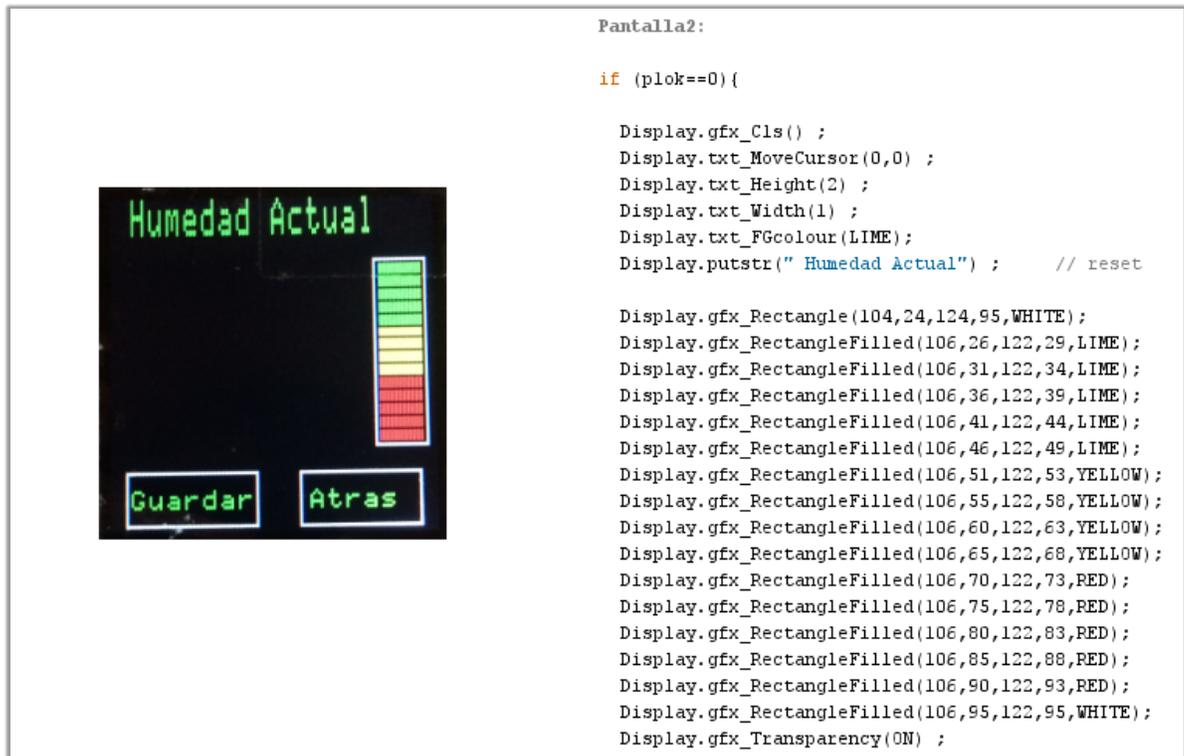


Figura 14. Impresión de pantalla 2

Una vez se ha impreso el entorno, se procede a realizar el proceso de captura de dato por medio del puerto análogo, figura 14, se realiza la conversión análogo/digital y se escala el valor obtenido.

```

hum= analogRead(A0);
mos=map(hum,0,1023,0,100);

```

Figura 15. Captura y escalización

Una vez el dato es impreso por pantalla el código se queda estático hasta recibir una orden de acción por medio del joystick, si se selecciona hacia la izquierda se almacena el dato capturado en la memoria, si se selecciona derecha se regresa hasta la Pantalla 1.

Ahora se selecciona la opción del Joystick hacia la **derecha**, se va a describir el proceso de guardado de datos.

Cuando se selecciona este lado, el código hará un salto hacia lo que se ha denominado pantalla 3, para realizar la impresión de un mensaje el cual indicara que los datos han sido almacenados correctamente en la tarjeta SD. El programa se queda en este ciclo hasta que recibe una orden por medio del joystick, cuando se selecciona el lado izquierdo, los datos que están almacenados en la memoria son borrados. Al seleccionar el lado derecho el programa regresa a Pantalla 1.

2.3.2 Diseño del encapsulado

Para realizar el diseño e implementar el prototipo del dispositivo se utilizó un material liviano y resistente llamado acrílico con un grosor de 4mm, se realizó un diseño modular en capas, donde se va ubicar la pantalla encima de la unidad de procesamiento; Ya que el acople entre la pantalla y la unidad de procesamiento queda con un ancho pequeño brinda la facilidad de agarre del dispositivo, además el joystick está ubicado en el centro lo que permite la manipulación del dispositivo con el dedo al que estamos acostumbrados a manejar los aparatos electrónicos portátiles.

La distribución de los elementos electrónicos se hizo en línea vertical con respecto a la posición de la pantalla, esto con el fin que el dispositivo tuviera apariencia común y similar al celular. La batería del dispositivo quedo ubicada en la parte inferior, los switches y conectores están ubicados en la parte lateral derecha y superior. Se optó por el color negro como color del dispositivo debido al contacto permanente que este debe de tener con tierra y materiales arenosos.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

En esta etapa se pretende poner a prueba el sensor elegido en diferentes ambientes, y así caracterizar su comportamiento al momento de realizar mediciones de humedad de suelo. Para esto fue necesario realizar pruebas en laboratorio, en donde se controlaron minuciosamente las cantidades de muestra de suelo y de agua suministrada. En estas condiciones se tomaron una cantidad de datos representativos para determinar el tipo de distribución estadística que siguen los datos. De esta manera se hallaron los parámetros de funcionamiento, el rango de operación y el margen de error de las mediciones obtenidas a través del sensor.

2.3.1 Descripción experimental

Con el fin de comparar las medidas obtenidas con el dispositivo y las medidas obtenidas por el método gravimétrico se construyen ambientes de suelos controlando las cantidades de muestras de suelo y de agua. De esta manera se siguen el siguiente procedimiento:

- 1:** Utilizando la balanza analítica marca Precisa XB220A se determina el peso de los beakers vacíos.
- 2:** De nuevo, utilizando la balanza analítica se depositan en cada uno de los beakers la misma cantidad de muestra. Los valores de masa tienen un error de 0,900g dado por la balanza. Según la información fabricante esta detecta variaciones de peso cada 0,001g.
- 3.** Se añade el agua a cada una de las muestras utilizando probetas de 25 y 100ml.
- 4.** Se pesa la muestra con agua y se verifica que todas tengan el mismo valor con el fin de garantizar que las condiciones de todos experimentos sean las mismas.
- 5.** Una vez garantizadas estas condiciones se procede a realizar las mediciones con el dispositivo como se muestra en la figura 16.

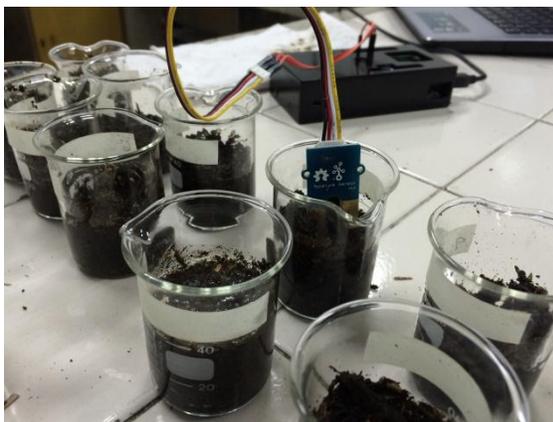


Figura 16. Toma de datos con el dispositivo

6. Al obtener el porcentaje de humedad de la muestra de suelo con el dispositivo, se procede a secar las muestras por medio del horno¹ a una temperatura de 110°C durante un tiempo de 24 horas.

7. Finalmente se determinará el peso en gramos de los beaker con la muestra secada por el horno.

8. Con los datos obtenidos en los pasos 4 y 7, se procede aplicar la fórmula (1), para obtener el porcentaje de humedad de cada muestra según el método gravimétrico.

2.3.2 Tratamiento estadístico de los datos

En esta parte se realiza un estudio estadístico de los datos con el fin de determinar la distribución que obedecen los datos y con ella los valores que se obtienen de la medida y su respectivo error, de esta manera se caracteriza el dispositivo con su correspondiente error en la medida de la humedad. Muchos trabajos de este tipo asumen sin ninguna prueba que los datos responden a una distribución normal sin embargo es necesario hacer la prueba con el fin de caracterizar adecuadamente el dispositivo según lo que sugiere (G, y otros, 2012).

Para esto se construyen sistemas siguiendo el procedimiento mencionado en la sección anterior para valores 5.8 %, 31,05% y 46,54% de humedad determinados por el método gravimétrico. En estos sistemas se realizaron medidas, utilizando 5 sensores resistivos de la misma referencia.

¹ Horno marca Thermo Scientific Heratherm

En la figura 17 se encuentra el histograma de los datos de las medidas de humedad obtenidos por los sensores correspondientes al valor de 5.8 % de humedad determinado por el método gravimétrico. En este caso se realizaron 500 medidas.

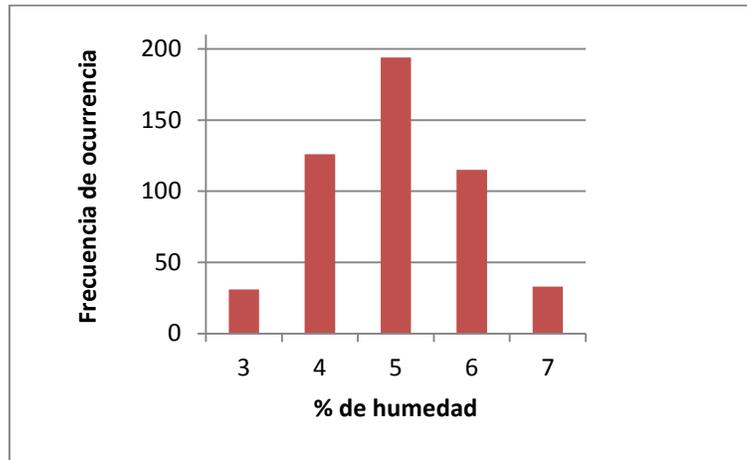


Figura 17. Datos de porcentaje de humedad correspondientes medida gravimétrica de 5.8%.

Para el histograma de la figura 17 se han calculado las cantidades estadísticas que describen el fenómeno, las cuales se presentan en la tabla 7. Es importante notar de estos datos que los valores de la media, mediana y la moda son aproximadamente los mismos, lo que indica que los datos obedecen a una distribución normal. Este hecho se refuerza ya que la distribución de los datos tiene forma de campana y que el valor para el coeficiente de asimetría es pequeño (con respecto a la media), lo que indica que los datos están concentrados alrededor de la media.

De esta manera, para el valor de humedad de 5.8% en la medida gravimétrica se obtiene con el sensor un valor de 5 ± 1 , en donde el error en la medida en ese caso se toma como el valor de la desviación estándar. Es importante notar que para estos valores de la medida el error es del 20% lo cual indica que las medidas para valores bajos de la humedad tiene una gran incertidumbre.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA RANGO ENTRE 3 – 7	
Media	4,904 ≈ 5
Error típico	0,04281629
Mediana	5
Moda	5
Desviación estándar	0,95740129 ≈ 1
Varianza de la muestra	0,91661723
Curtosis	-0,44634332
Coefficiente de asimetría	0,02790575
Rango	4
Mínimo	3
Máximo	7
Suma	2452
Cuenta	500

Tabla 8. Estadística descriptiva correspondientes medida gravimétrica de 5.8%.

Para la segunda prueba el valor obtenido por el método gravimétrico fue 31,05%, se realizaron 400 mediciones de la misma manera que se indicó en la experiencia anterior. Los resultados de estas mediciones se presentan en la figura 18.

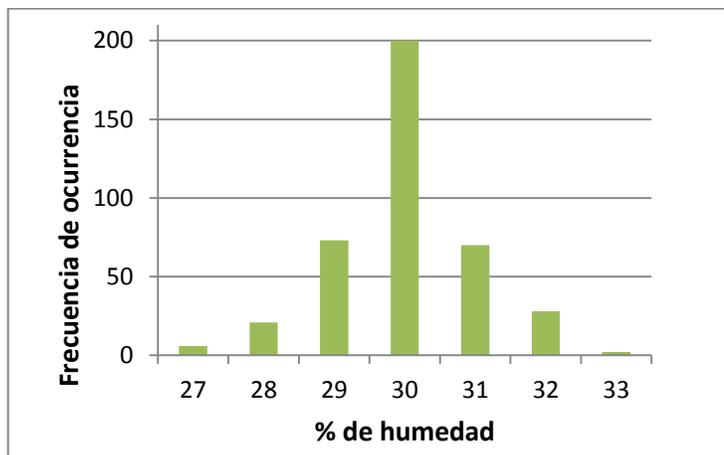


Figura 18. Datos de porcentaje de humedad correspondientes medida gravimétrica de 31.05%.

Como en el caso anterior, se puede ver que los datos tienen forma de campana y que los datos de la media, mediana y moda son iguales (tabla 8), además del bajo valor en el coeficiente de asimetría, indicando que la distribución es normal. Con esto, la medida de la humedad obtenida por medio del dispositivo es 30 ± 1 , para lo cual el error en la medida es del 3% con respecto al valor de la medida. Además cuando se compara este valor de la medida con el obtenido por el método gravimétrico el error porcentual de las medidas es de 3.4%, el cual indica que la medida es muy cercana a la obtenida por el método gravimétrico.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA RANGO ENTRE 27 – 33	
Media	29,9975 \approx 30
Error típico	0,05074616
Mediana	30
Moda	30
Desviación estándar	1,01492311 \approx 1
Varianza de la muestra	1,03006892
Curtosis	0,75267164
Coefficiente de asimetría	-0,12508881
Rango	6
Mínimo	27
Máximo	33
Suma	11999
Cuenta	400

Tabla 9. Estadística descriptiva para rango entre 27 – 33

En la tercera prueba el valor obtenido por el método gravimétrico fue 46,54%, se realizaron 500 mediciones y los resultados se presentan en la figura 18 y los respectivos datos estadísticos se presentan en la tabla 8.

De nuevo se puede concluir que los datos obedecen a una distribución normal como en los casos anteriores. Sin embargo el valor 0,774907506 del coeficiente de asimetría indica que los datos están distribuidos mayoritariamente hacia la izquierda. En consecuencia la medida obtenida por medio del dispositivo es 45 ± 1 que comparado con el valor obtenido por el método gravimétrico (46,45) resulta un error porcentual del 3.1%

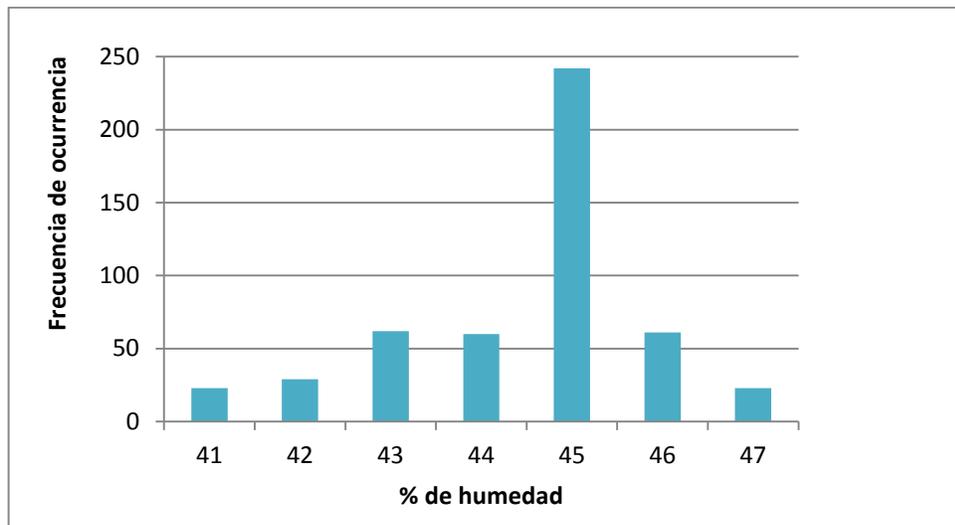


Figura 19. Distribución normal para un rango entre 41 – 47

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA RANGO ENTRE 41 – 47	
Media	44,488
Error típico	0,061995151
Mediana	45
Moda	45
Desviación estándar	1,386253728
Varianza de la muestra	1,921699399
Curtosis	0,317969639
Coefficiente de asimetría	-
Rango	6
Mínimo	41
Máximo	47
Suma	22244
Cuenta	500

Tabla 10. Estadística descriptiva para rango entre 41 – 47

De esta manera, se puede ver que los datos en todos los obedecen a una distribución normal, donde la medida de la humedad está dada por el valor de la media y el error es la desviación estándar en cuyo caso corresponde a 1, con lo cual tomaremos este como el error del aparato.

3. RESULTADOS

Una vez explicado el método de medición de humedad para realizar las pruebas y conociendo el comportamiento del dispositivo, se procede a medir la humedad en varios beaker con muestras, con la misma cantidad de tierra pero con diferentes cantidades de agua.

Se seleccionaron 28 beakers a cada uno se le agregó la misma cantidad de muestra 20g. Los beaker fueron divididos en dos grupos de 14 denominados grupo 1 y 2 respectivamente, esto con el fin de realizar las mismas mediciones dos veces y así observar la variabilidad de la medida en dos beakers con las mismas condiciones de muestreo (cantidad de agua y peso).

Para el grupo 1 y 2, se muestran los datos obtenidos en las tablas 10 y 11 respectivamente, los datos mostrados son las humedades obtenidas por el método gravimétrico y el dispositivo, adicionalmente se calculó el % de error del valor de humedad del dispositivo con respecto al valor de humedad del método gravimétrico.

En las figuras 20 y 21 se muestran gráficamente los datos obtenidos con el método gravimétrico (diamantes azules) y las medidas realizadas con el dispositivo (cuadros granate) en función de la cantidad de agua. Según los resultados que se presentaron anteriormente.

GRUPO # 1				
Beaker	Cant. de Agua [ml]	Humedad P. Gravimétrica [%]	Humedad Dispositivo [%]	% de Error entre los métodos
1	2,5	49,45	44,33	10,35
2	3,0	51,02	53,00	-3,88
3	6,0	56,84	59,00	-3,81
4	7,0	57,33	59,67	-4,08
5	9,0	60,12	60,67	-0,91
6	10,0	64,43	66,33	-2,95
7	11,5	63,54	61,33	3,47
8	13,0	66,54	66,67	-0,19
9	15,0	67,41	70,33	-4,34
10	16,0	67,95	62,67	7,78
11	17,0	69,02	69,00	0,02
12	20,0	68,91	68,67	0,36
13	22,0	72,40	64,67	10,68
14	25,0	73,80	65,67	11,03

Tabla 11. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 1

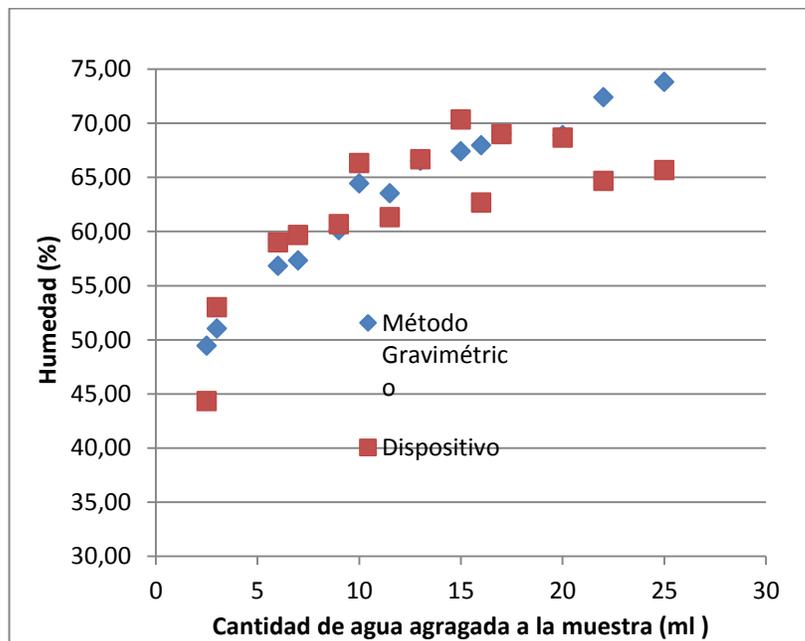


Figura 20. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 1

GRUPO # 2				
Beaker	Cant. de Agua [ml]	Humedad P. Gravimétrica [%]	Humedad Dispositivo [%]	% de Error entre los métodos
1	2,5	48,89	47,00	3,88
2	3,0	50,36	57,00	-13,20
3	6,0	56,07	59,67	-6,42
4	7,0	57,28	60,67	-5,91
5	9,0	62,24	60,00	3,60
6	10,0	63,35	64,33	-1,55
7	11,5	63,24	61,00	3,54
8	13,0	64,63	66,00	-2,12
9	15,0	67,45	70,00	-3,79
10	16,0	68,77	68,00	1,12
11	17,0	69,58	71,00	-2,04
12	20,0	72,07	69,33	3,79
13	22,0	72,77	6,67	7,01
14	25,0	73,50	61,67	16,10

Tabla 12. Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 2

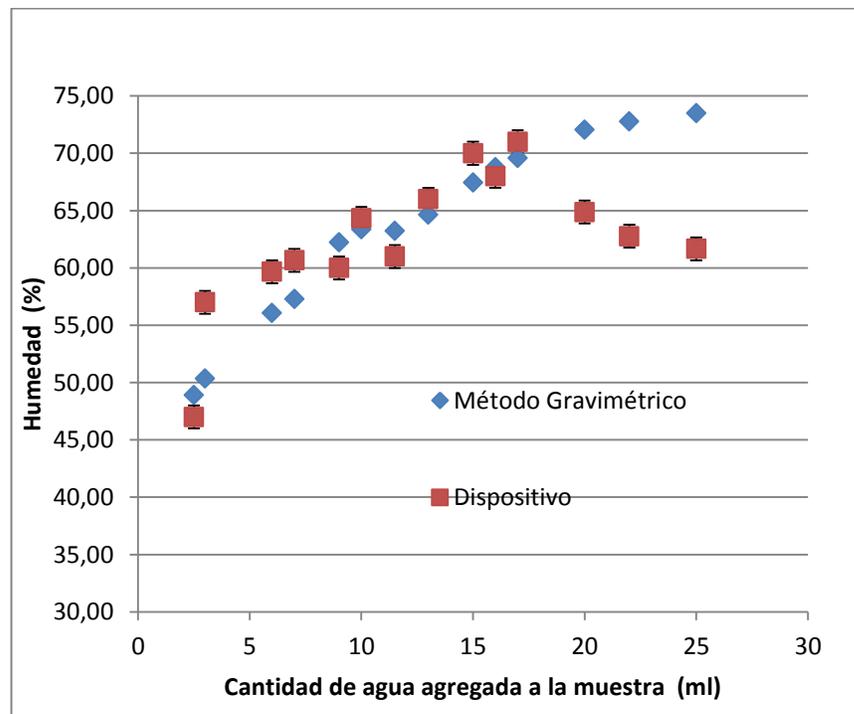


Figura 21. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 2

Como se puede ver en las tablas 10 y 11 (figuras 20 y 21) para los valores que se encuentran entre los rangos de 53% a 68%, presentan gran similitud y su error porcentual con respecto al método gravimétrico es alrededor del 5%, lo que muestra que el dispositivo entrega mediciones aproximadas y pueden ser comparadas con un método estándar. También es importante mencionar que los datos que presentan un error porcentual mayor $\pm 5\%$ son aquellos que tienen poca cantidad de agua, lo que se ve traducido en valores de humedad menores a 30 y cercanos a la saturación. Este resultado lo han mostrado otros actores para dispositivos similares, en donde reportan que los sensores resistivos no funcionan bien para humedades mayores al 70% ± 5 (G, y otros, 2012) (F.S & J. Xin, 1994). Además es importante mencionar que los dispositivos que funcionan con sensores resistivos tienen limitantes que dependen del tipo de suelo, algunos autores han mencionado (Kalinski & Kelly, 1993) que los suelos con los que no se recomienda usar sensores resistivos son los suelos limosos, arcillosos y fangosos.

Para validar estos datos se realizaron dos pruebas adicionales con el procedimiento mencionado anteriormente, las cuales se denominaron grupo 3 y 4. En estas pruebas se utilizaron 7 beaker por grupo con una cantidad de muestra de suelo de 90g. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 12 y 13, y se visualizan en las figuras 22 y 23 respectivamente.

GRUPO # 3				
Beaker	Cant. de Agua [ml]	Humedad P. Gravimétrica [%]	Humedad Dispositivo [%]	% de Error entre los métodos
1	0	50,20	51,8	-3,19
2	5	52,44	55,0	-4,88
3	10	53,67	56,6	-5,46
4	15	56,37	59,8	-6,08
5	20	57,81	60,0	-3,79
6	25	60,73	63,8	-5,06
7	30	62,24	64,0	-2,82

Tabla 13 Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 3

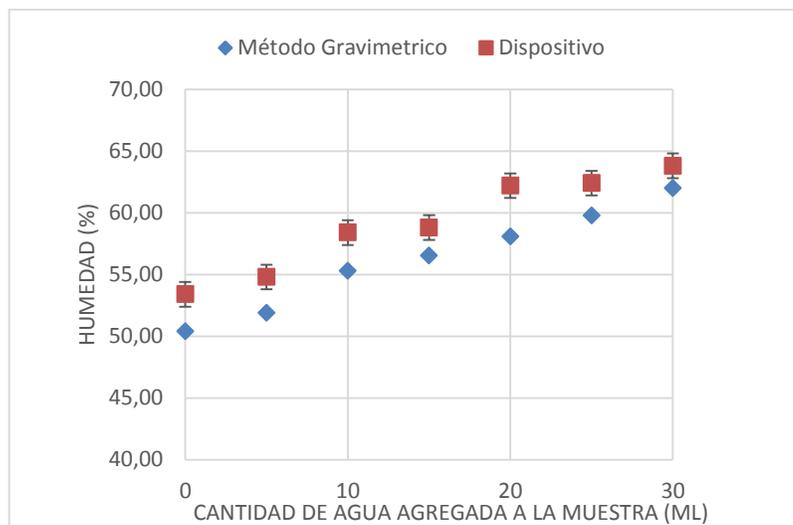


Figura 22. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 3

GRUPO # 4				
Beaker	Cant. de Agua [ml]	Humedad P. Gravimétrica [%]	Humedad Dispositivo [%]	% de Error entre los métodos
1	0	50,40	53,4	-5,96
2	5	51,90	54,8	-5,60
3	10	55,30	58,4	-5,61
4	15	56,53	58,8	-4,02
5	20	58,07	62,2	-7,11
6	25	59,78	62,4	-4,38
7	30	61,98	63,8	-2,93

Tabla 14 Valores de humedad método gravimétrico y Dispositivo para el grupo 4

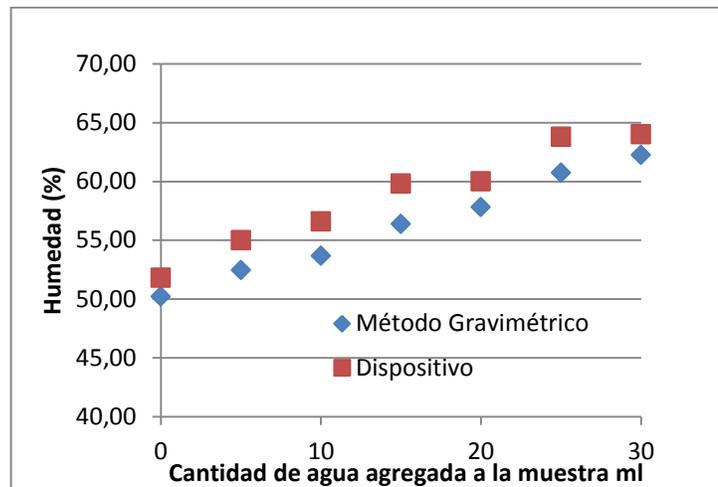


Figura 23. Humedad Vs Cantidad de agua para el grupo 4

Como se puede ver en las tablas 11 y 12 para los valores que se encuentran entre el rangos de 50 y 61%, los resultados presentan gran similitud pero su error porcentual tiene una tendencia aumentar. Sin embargo estas desviaciones no superan el 10% lo que indica que las medidas varían en menos de este porcentaje.

Por medio de pruebas se pudo establecer que los sensores utilizados para esta segunda prueba se estaban deteriorando, y una de las posibles causas del deterioro del sensor es el tipo de alimentación que tiene, este sensor es alimentado con corriente continua lo que produce la electrolisis del agua afectando la vida útil de los electrodos.

4. CONCLUSIONES

Se pudo construir un dispositivo portátil para la medición de la humedad en suelos. Este dispositivo permite guardar los datos en una unidad extraíble (memoria micro sd) con el fin de que los datos puedan leerse y analizarse estadísticamente.

Por medio de pruebas iniciales se caracterizó el dispositivo logrando mostrar que los datos obedecen una distribución normal a partir de la cual se obtiene que el error en la medición de la humedad en el suelo es de 1.

Se desarrollaron varias pruebas con el fin de determinar el rango de validez de las medidas. En este aspecto se obtiene un rango sugerido de medidas entre el 30 y 70 muy similares a los rangos obtenidos por otros autores. Además las medidas realizadas no se desviaron considerablemente con respecto a las obtenidas por el método gravimétrico, en donde dichas desviaciones no superaron el 10%.

De esta manera se pudo construir un dispositivo con el que se obtienen medidas muy cercanas a aquellas determinadas por el método gravimétrico, con la gran ventaja de que éstas se pueden obtener de manera inmediata y sin necesidad de tener aparatos que solo pueden estar en laboratorios, como la balanza analítica y el horno, mostrando así tanto la confianza en las medidas y la portabilidad del aparato, hecho que es de suma importancia para las medidas en campo que realizan los profesionales del área ambiental.

Es importante tener en cuenta que este tipo de dispositivos no se deben utilizar en terrenos limosos, arcillosos o fangosos ya que este tipo de suelo satura el sensor y las mediciones son erróneas (G, y otros, 2012).

ANEXO 1

MANUAL DE USUARIO DEL DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DE SUELOS



Tabla de contenido

1. Introducción
2. Descripción del dispositivo
3. Reemplazo de batería
4. Operación del dispositivo

Tabla de imágenes

Imagen 1	Descripción del sensor de humedad de suelos
Imagen 2	Tornillos de seguridad de cubierta exterior
Imagen 3	Pantalla inicial
Imagen 4	Pantalla de Captura de humedad
Imagen 5	Pantalla de Registros de humedad

Introducción

Este documento está diseñado con el propósito de brindarle al usuario la información acerca del manejo del dispositivo “Sensor de humedad de suelos”. Se ha realizado una guía gráfica, la cual brinda al lector una explicación clara acerca de las funciones y formas correctas de operar el dispositivo.

1. Descripción del dispositivo

En la figura 1 se muestra la descripción de cada uno de las partes del dispositivo.

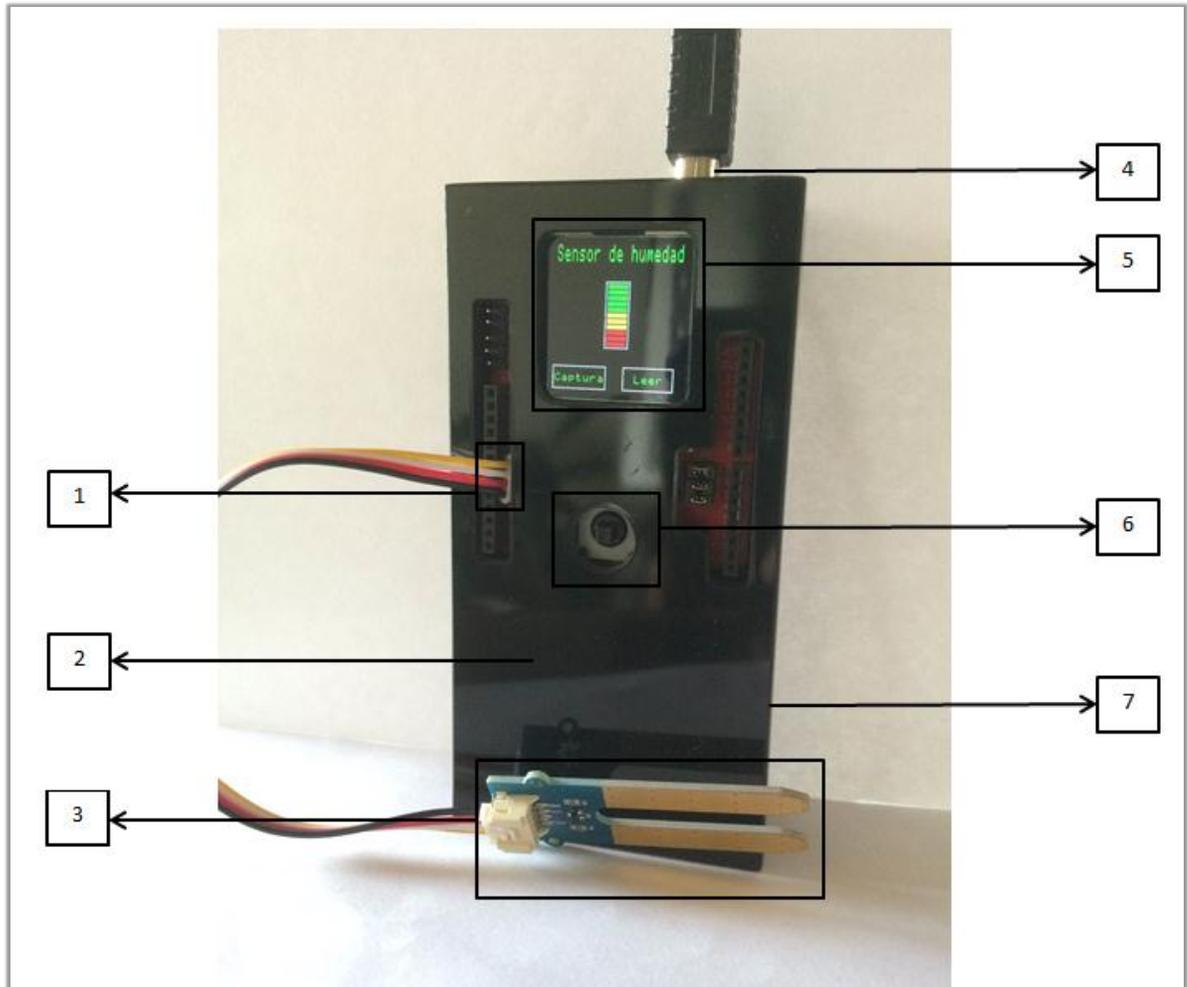


Figura 1. Descripción del sensor de humedad de suelos

1. Conexión de sensor de humedad de suelo (Pines Vcc, Gnd, A0)
2. Batería
3. Sensor de medición
4. Conexión USB
5. Pantalla LCD
6. Joystick multifunción
7. Switch de encendido y apagado.

2. Reemplazo de la batería

1. Apague el dispositivo
2. Retire los 2 tornillos ubicados en la parte inferior. (tornillo tipo estrella)



Figura 2 (Tornillos de seguridad de cubierta exterior)

3. Levante la cubierta superior del dispositivo.
4. Reemplace la batería de 9v.
5. Asegure la batería y la cubierta nuevamente.
6. Usted, como usuario final, está legalmente obligado (Reglamento de baterías) a regresar todas las baterías y acumuladores usados; ¡el desecho en el desperdicio o basura de la casa está prohibido.

3. Operación

El primer paso para poner en funcionamiento el dispositivo es validar que el sensor se encuentre conectado correctamente a los pines Vcc, Gnd y A0. Una vez se verifica esto, el siguiente paso es encender el “sensor de humedad de suelos”, esto se realiza por medio del switch que se encuentra ubicado al lado derecho. Cuando el dispositivo se halla encendido, mostrara el menú principal.



Figura 3 (Pantalla inicial)

En este menú se podrán ver las características ofrecidas por el “sensor de humedad de suelos” Capturar y leer. Cuando se quiera conocer el valor de humedad del suelo se valida que el sensor este inmerso en la muestra y por medio del joystick se presiona hacia el lado izquierdo que es el equivalente a Captura. Inmediatamente por pantalla se imprime el valor de humedad del suelo que rodea el sensor.



Figura 4 (Pantalla de Captura de humedad)

En la pantalla de captura de humedad se tiene acceso a otra de las funciones “guardar”, basta con presionar el joystick hacia la izquierda para almacenar el dato de humedad de suelo. Si el joystick se presiona hacia el lado derecha, se regresa a pantalla inicial.

En la pantalla inicial queda una característica por explorar, presionar el joystick hacia el lado derecho esta opción es equivalente a guardar en el menú de la pantalla, cuando presionamos esta opción nos muestra un mensaje indicándonos que los datos se guardaron correctamente, Presionando el joystick hacia el lado derecho se regresa a la pantalla inicial.

Bibliografía

- Césped Group . (2009). *Césped.es*. Obtenido de www.cesped.es/riego-del-cesped/
- 4D Systems. (2010). *4D SYSTEMS turning technology into art*. Obtenido de www.4dsystems.com.au/product/uLCD_144_G2/
- ARDUINO. (2011). Obtenido de arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno
- Cardona, F., & Zamora, J. C. (2008). *Gfnun*. Obtenido de www.gfnun.unal.edu.co/prodGrupo/JCZamoraTG08.pdf
- Carlos, I., & González, A. (2009). Contenido de Humedad del Agua en el Suelo. 1-8.
- D.A, R., C.S, C., J.W, H., B.K, H., & S.B. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological moistureshed-scale observatories: a review. *Vadose Zone*, 358-389.
- Decagon Devices, Inc. (2007 - 2014). *Decagon Devices (Manuals)*. Obtenido de manuals.decagon.com/Manuals/13876_EC-5_Web.pdf
- Decagon Devices, Inc. (2007-2013). *Decagon Devices (Manuals)*. Obtenido de manuals.decagon.com/Manuals/13508_10HS_Web.pdf.
- Dias, P. C., Roque, W., Ferreira, E. C., & Dias, J. A. (2013). A high sensitivity single-probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor. *Comput. Electron. Agric*, 139–147.
- Evelt, S., Heng, L., Moutonnet, P., & Nguyen, M. (2008). Field estimation of soil water content. *A practical guide to methods, instrumentation and sensorechnology*. Austria, Vienna: International Atomic Energy Agency.
- F.S, Z., & J. Xin. (1994). Soil Moisture Sensors. *Florida Cooperative Extension Service*. Florida: Inst. Food and Agricultural Sciences.
- Felipe, F., Eva, H., & Celsa, P. (2007). Uso eficiente del agua en el cultivo de la fresa. Proyecto ECOSAT. *Congreso Iberico*. Madrid.
- Fernández, H., & Lysbet, C. (2009). Diseño de un sistema de sensado remoto del nivel de humedad en terrenos agrícolas ecológicos utilizando una red de sensores inalámbrica bajo el protocolo 802.15.4.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Fao.org*. Obtenido de www.fao.org/fi/glossary/aquaculture/spec-term-n.asp

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008). *Fao.org*. Obtenido de www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sm/sm_pres.pdf
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Fao.org*. Obtenido de www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/
- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of Soil Science*.
- Friedman, S. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity a Review. *Comput Electronic Agric*, 45-70.
- Fuentelzas, F., Hernandez, E., & Peitado, C. (2007). Uso eficiente del agua en el cultivo de fresa Proyecto ECOSAT. *Congreso Iberico*. Madrid.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., & Taya. (1999). The micro structures of clay given. *Eng. Geo*, 43 - 53.
- G, C., L, B., A, P., S, P., V, L., F, M., & T, M. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 101-112.
- Hymet, D., Moran, M., & Keefer, T. (2000). Soil moisture evaluation using a hydrologic model and calibrated sensor network. *Soil Soc Am*, 319-326.
- I. Carlos, A. G. (2008). *Contenido de Humedad del Agua en el Suelo*. Obtenido de Virtual unal : http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/raspa/und_2/pdf/und2.pdf
- I. Carlos, A. G. (2008). *Virtual unal*. Obtenido de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/raspa/und_2/pdf/und2.pdf
- Ibañez, J. J. (26 de 06 de 2006). *mi+d*. Obtenido de www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/06/26/33002
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2010). *El cambio climático y los recursos*. Recuperado el 23 de 07 de 2014, de Climate change and resources: https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/ccw%20sp/chapter_4_sp.pdf
- Kalinski, R., & Kelly, W. (1993). Estimating water content of soils from electrical. *ASTM Geotech*, 323-329.
- Kandala, C., Nat. Peanut Res. Lab., D., & Butts, C. (2008). Design and performance of a capacitor sensor and impedance. *Springer Science+Business Media*, 240 - 242.
- Kouro, S. (2001). *Sensores De Humedad*. Chile: Universidad técnica Federico Santa María.

- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., & Sdao, F. (2005). 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine (Southern Italy). *Geophysics*, B11 - B18.
- Michot, D., Y, B., A, D., B, N., D, K., & Tabbagh. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography.
- Montenegro, D., & H., M. (1990). Propiedades Físicas de los Suelos. *Instituto Geográfico A. Codazzi*.
- Quintero, J., & Ernesto, T. (2007). Estudio de las técnicas nucleares aplicadas a la medición de la humedad del suelo. *Revista ingenio libre*.
- Reynolds, S. (1970). The gravimetric method of soil moisture determination Part I A study of equipment. *Journal of Hydrology*, 258-273.
- Salazar, Z. V. (2013). Diseño de un sistema electrónico para riego de humedad de suelos y comunicación inalámbrica. Perú.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science a review. *Soil Till*, 173 - 193.
- Susha, L. S., D.N, S., & Maryam, S. B. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 92-105.
- U, L. L. (23 de 08 de 2003). *Fruticultura*. Obtenido de fruticultura.net/tutoriales/neutron/neutron.html
- Walker, J., & P, H. (2002). Evaluation of the Ohm Mapper instrument for soil moisture measurement. *Soil sci*, 728 - 734.
- Zhou, Q., Shimada, J., & A, S. (2001). Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity. *Water Resource*, 273-285.
- Zhu, J., Kang, H., & Y, G. (2007). Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. *Pedosphere*, 801 - 812.