

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**DESARROLLO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO DE MONITOREO DE
HUMEDAD DEL SUELO**

P O R

LUIS JOEL CANTÚ GUERRERO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

TORREÓN, COAHUILA

JUNIO DEL 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DESARROLLO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO DE MONITOREO
DE HUMEDAD DEL SUELO

POR
LUIS JOEL CANTÚ GUERRERO

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR

PRESIDENTE:


M.C. CARLOS EFREN RAMIREZ CONTRERAS

VOCAL:


M.C. JOSÉ GUADALUPE GONZÁLEZ QUIRINO

VOCAL:


DRA. VICTORIA JARED BORROEL GARCÍA

VOCAL SUPLENTE:


M.C. BRAULIO DUARTE MORENO


M.E. VICTOR MARTÍNEZ CUETO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DESARROLLO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO DE MONITOREO
DE HUMEDAD DEL SUELO

POR
LUIS JOEL CANTÚ GUERRERO

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR

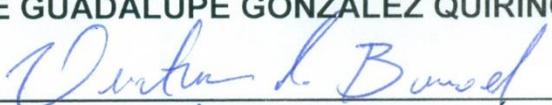
ASESOR PRINCIPAL:


M.C. CARLOS EFREN RAMIREZ CONTRERAS

ASESOR:


M.C. JOSÉ GUADALUPE GONZÁLEZ QUIRINO

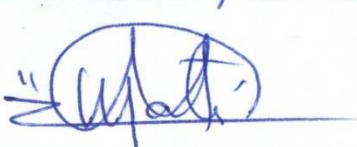
ASESOR:


DRA. VICTORIA JARED BORROEL GARCÍA

ASESOR:


M.C. BRAULIO DUARTE MORENO




M.E. VICTOR MARTÍNEZ CUETO

Coordinación de la División
Carreras Agronómicas

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Agradecimientos

A MI “ALMA TERRA MATER” Por haberme brindado la oportunidad de formar parte de esta institución, lo cual considero un privilegio y me siento orgulloso.

A MIS ASESORES por brindarme su confianza y su apoyo, gracias a su experiencia y conocimientos compartidos, he aprendido a manejar nuevas herramientas que han sido parte fundamental en este proyecto y me seguirán siendo útiles en el proceso de mi vida laboral, gracias por ser parte de este logro del cual me siento muy feliz.

A MIS COMPAÑEROS por los momentos que pasamos en estos cuatro años y por demostrar compañerismo aprendiendo cosas unos de otros. A mis compañeros y amigos Adan, Bernardo, Claudia, Guillermo, Limber, Manuel, Nestor y Omar, que me han sabido comprender a pesar de todo y me han acompañado en mi formación, sin ellos esta etapa de mi vida no hubiera sido la misma, gracias por la gran amistad que me brindaron y por los momentos que compartimos juntos, nunca los olvidare.

A TODO EL PERSONAL DEL DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE, ya que han colaborado brindándome los elementos necesarios en el proceso de mi formación académica. **AL CINVESTAV GDL** por sembrarme la semilla de las nuevas tecnologías y abrirme las puertas a nuevas áreas de conocimiento y disciplinas, que resultaron en el tema de este trabajo.

Dedicatoria

PARA MI MADRE Gracias Madre primero que nada por darme la vida, por apoyarme en lo que he decidido emprender, por esos consejos que me han servido muchísimo para enfrentar la vida, por aquellas palabras de ánimo, muchas gracias y recuerda que te quiero muchísimo.

A MIS HERMANOS Y SOBRINOS

MONICA

GERARDO

SERGIO

SEBASTIAN

PARA FAMILIA Gracias por apoyarme en los momentos difíciles y darme la mano cuando lo necesite, son una parte fundamental de este y todos mis logros.

Índice de Contenido

Agradecimientos	i
Dedicatoria	ii
Índice de Contenido	iii
Índice de Cuadros	v
Índice de Figuras	v
Resumen	vi
I. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis	3
II. Revisión de Literatura	4
2.1 Humedad en el suelo	4
2.1.1 Humedad gravimétrica	4
2.1.2 Humedad volumétrica	5
2.1.3 Estados de humedad en el suelo	5
2.1.4 Curva de retención de humedad	8
2.2 Técnicas de medición de humedad en el suelo	10
2.2.1 Método gravimétrico	10
2.2.2 Sonda de contaste dialéctica	11
2.2.3 Sonda de neutrones	11
2.2.4 Tensiómetro	12
2.2.5 Sensor de humedad resistivo	13
2.3 Redes de sensores inalámbricos en la agricultura	14
2.3.1 Agricultura de precisión	15
2.3.2 Riego de precisión	16
2.3.3 Red de sensores inalámbricos	18

2.3.4	Otras aplicaciones	20
III.	Materiales y métodos	21
3.1	Componentes del sistema.....	22
3.1.1	Placa microcontroladora	22
3.1.2	Sensor de humedad	25
3.1.3	Protocolo de comunicación, Zig-Bee	27
3.1.4	Adquisidor de datos	29
3.1.5	Interfaz de usuario	31
3.2	Calibración del sistema.....	31
3.3	Instalación y demostración del sistema	39
IV.	Resultados	43
V.	Conclusiones	44
VI.	Bibliografía	46

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Resumen de especificaciones, Arduino Mega2560	24
Cuadro 2. Especificaciones, sensor de humedad del suelo DFRobot	26
Cuadro 3. Especificaciones, RaspberryPi Modelo B	30
Cuadro 4. Ejemplo de formato de colección de datos para la calibración del sensor....	36
Cuadro 5. Resultados del procedimiento de calibración del sensor	43

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de componentes del sistema	22
Figura 2. Placa arduino mega 2560.....	23
Figura 3. Xbee shield.....	25
Figura 4. Sensor de humedad del suelo DFRobot.....	26
Figura 5. Diagrama de conexión del sensor de humedad	27
Figura 6. Módulo Xbee-pro	28
Figura 7. Mini computadora Raspberry Pi	30
Figura 8. Captura de pantalla de registro de datos en Excel	40
Figura 9. Graficación de datos en hoja de cálculo en Excel.	41
Figura 10. Captura de pantalla de registro de datos en la plataforma Xively	42
Figura 11. Datos de salida y ecuación de calibración.....	44

Resumen

El contenido de humedad en el suelo es uno de los aspectos críticos en las explotaciones agrícolas, el cual influye drásticamente en la calidad y producción de los cultivos.

Un sistema inalámbrico presenta grandes ventajas operativas y prácticas frente a los sistemas convencionales de monitoreo, por mencionar uno, no se requiere de la visita de personal a campo para consultar los valores, si no que se puede acceder remotamente desde una computadora. La introducción de este tipo de sistemas al agro Mexicano representaría una ventaja competitiva que se reflejaría en la calidad y producción de los cultivos y el mejor aprovechamiento de los recursos existentes.

El principal objetivo de este proyecto fue investigar el desarrollo de un sistema inalámbrico de monitoreo de humedad en el suelo, se desarrolló dentro de las instalaciones del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. En una primera etapa se seleccionaron los componentes del sistema: sensor, protocolo de comunicación (Zigbee) y adquisidor de datos (RaspberryPi) y se integraron para después realizar una calibración en laboratorio que arrojó una ecuación correspondiente al tipo de suelo.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, logrado obtener un sistema funcional y económico, con todas las ventajas que al ser inalámbrico implica.

Palabras clave: sensor, humedad, inalámbrico, Zigbee, monitoreo

I. Introducción

La productividad de las tierras de riego es aproximadamente tres veces superior a la de las de temporal. Más allá de este dato global, existen muchas razones para destacar la función del control de los recursos hídricos en la agricultura. La inversión en la mejora de los regadíos supone una garantía frente a las variaciones pluviométricas y estabiliza la producción agrícola, impulsando la productividad de los cultivos y permitiendo que los agricultores diversifiquen su actividad. Ello tiene un reflejo en un incremento y una menor volatilidad de los ingresos agrícolas.

Sin embargo son pocos los productores en nuestro país que implementen algún instrumento o practica de medición de la humedad en el suelo, generalmente se siguen criterios teóricos para la aplicación del agua al sembradío, lo que deja en incertidumbre las eficiencias en el uso del agua para riego.

Por citar un ejemplo, en el Distrito de Riego 017 la dotación de agua se maneja en base a un derecho el cual equivale a una superficie, y se le da agua para regar dicha superficie, solo cuando las presas están en niveles bajos, se cambia la forma de control de superficie a regar a volumen entregar. Lo que a la luz de los avances tecnológicos de la actualidad es una práctica muy rudimentaria, siendo que existen los medios para determinar de una manera más precisa la dotación adecuada para los productores.

En el caso de la agricultura protegida, que es en donde más comúnmente se ve algún dispositivo con la función del censado de la humedad en el suelo, se siguen utilizando en su mayoría instrumentos poco prácticos como los tensiómetros, los cuales requieren de la intervención constante de una persona para su mantenimiento y registro de los datos.

En ello cae la importancia del desarrollo de una plataforma que permita a los productores tener datos constantes y que requieran una intervención mínima del personal en campo. Con lo cual puedan apoyarse para la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico para las explotaciones agrícolas y con todos los beneficios que trae el optimizar el uso de agua.

Los sistemas de redes inalámbricas junto con los avances de miniaturización de dispositivos, han abierto un abanico de aplicaciones entre las que destaca la agricultura de precisión. Protocolos inalámbricos como el Zig-Bee que se implementan con sensores de bajo costo y uso eficiente de energía eléctrica, permiten desarrollar aplicaciones que antes estaban limitadas por estos dos aspectos.

Una tecnología inalámbrica además de ser más cómoda en la práctica, reduce la intervención del hombre y por ende la posibilidad de error. Posibilita la interacción con Internet y la disposición la información de manera inmediata en bases de datos accesibles para cualquier persona interesada en la misma.

1.1 Objetivos

El presente proyecto, tiene como objetivo principal desarrollar un sistema inalámbrico de monitoreo de humedad del suelo, que apoye a la toma de decisiones en cuanto al manejo de agua durante el desarrollo de los cultivos.

1.2 Hipótesis

La implementación de sistemas de sensores inalámbricos es una herramienta de apoyo para los sistemas que requieran de una planeación en la toma de decisiones.

II. Revisión de Literatura

2.1 Humedad en el suelo

El agua de riego que se aplica al cultivo se infiltra en el suelo saturando la capa superficial del mismo desde donde se transmite y redistribuye a la capa superficial del mismo desde donde se trasmite y redistribuye hacia capas subterráneas hasta que una parte del agua drena del perfil del suelo ocupado por las raíces. La velocidad de este movimiento depende de las propiedades hidráulicas del suelo las cuales se relacionan con la textura, siendo mayor en suelos de textura arenosa que en suelos pesados de textura arcillosa. Como consecuencia de este movimiento y del consumo de agua por evapotranspiración, contenido de humedad en el suelo disminuye con el tiempo. (Ignacio G., Gregorio B. 2009)

2.1.1 Humedad gravimétrica

Es el contenido de masa de agua relativo a las partículas de masa de suelo seco, ocasionalmente se refiere a este como contenido “gravimétrico de humedad”. El termino suelo seco es generalmente definido como el suelo secado a un estado de equilibrio en un horno a una temperatura de 105°C, sin embargo las arcillas comúnmente contienen apreciables cantidades de humedad en un estado de secado incluso a temperaturas mayores. El suelo secado a temperatura ambiente generalmente contiene un contenido de humedad mayor al secado en un

horno, debido al fenómeno de absorción de vapor de humedad generalmente conocido como “Higroscopicidad”.

$$W = \frac{M_w}{M_s}$$

2.1.2 Humedad volumétrica

La humedad volumétrica (contenido volumétrico de humedad) es generalmente computado a partir de la base de que el total del volumen de suelo más que en el volumen de las partículas solas. En suelos arenosos, el contenido de humedad volumétrica en un estado de saturación está en el orden de 40-50%; en un suelo de textura media ronda el 50%; y en suelos arcillosos esta puede ser en el orden del 60%. En adelante, el contenido relativo de volumen de agua en un estado de saturación puede exceder la porosidad de suelo seco, debido a que los suelos arcillosos tienden a hincharse al humedecerse. El uso del contenido de humedad volumétrico en lugar del contenido gravimétrico para expresar el contenido de humedad es generalmente más conveniente porque es más directamente adaptable a la computación de los flujos y contenido de agua agregado al suelo por el riego o la lluvia y a cantidades sustraídas del suelo por la evapotranspiración y el drenaje. (Daniel H. 1971)

2.1.3 Estados de humedad en el suelo

Las definiciones de entrada de aire and entrada de agua son utilizadas para referirse a la variación de presión necesaria para que el aire entre en un sistema saturado de agua o el agua entre en un sistema saturado de aire. (A.W. Warrick. 2002)

2.1.3.1 Saturación

La saturación o no saturación de los suelos generalmente se refiere a que los poros están llenos o vacíos o solamente parcialmente llenados con agua y el espacio remanente es ocupado por aire. Si la presión de agua es más grande que la ambiental entonces se encontrara efectivamente en un estado de saturación. Incluso cuando el agua está bajo una ligera tensión, el sistema del suelo tendera a estar efectivamente saturado hasta que el déficit de tensión exceda un valor de “entrada de aire”. Después si el déficit es excedido, el aire es libre de entrar en el sistema y remplazar el agua en los poros más grandes. Un suelo no saturado tiene el espacio entre poros parcialmente llenado con aire y un contenido de agua bajo presión. (A.W. Warrick. 2002)

2.1.3.2 Capacidad de campo

Con la aplicación del riego no se busca saturar el perfil del suelo sino elevar su contenido de humedad hasta un nivel óptimo para el cultivo conocido como capacidad de campo (θ_{cc}). Este se define como la cantidad máxima de agua que el suelo puede tener contra la fuerza de la gravedad, después de haber sido

saturado y en ausencia de evaporación directa, condición que se logra en un periodo de 3 a 10 días dependiendo del tipo de suelo y su capacidad para retener el agua. En términos prácticos, θ_{cc} se refiere al contenido de humedad que se logra en el suelo después de que el movimiento descendente o drenaje del agua ha disminuido hasta un nivel que podría considerarse como una pérdida de agua mínima o despreciable. (Ignacio G., Gregorio B. 2009)

2.1.3.3 Punto de marchites permanente

El riego debe aplicarse antes de que la humedad disponible en el suelo se agote por completo. Para esto se toma como referencia un contenido de humedad mínimo permisible para las plantas conocido como punto de marchitez permanente (θ_{PMP}). Bajo este contenido de humedad, ciertas plantas o cultivos indicadores son incapaces de recuperar su turgencia, aun después de colocarse en una atmosfera saturada por un periodo de 12 horas. (Ignacio G., Gregorio B. 2009)

2.1.3.4 Humedad aprovechable

Al rango de humedad comprendido entre θ_{cc} y θ_{PMP} se le conoce como humedad aprovechable (HA) máximas para las plantas y se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por la raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})Pr$$

donde Θ_{CC} y Θ_{PMP} se expresan en m^3 de agua por m^3 de suelo, HA y Pr en metros. (1)

2.1.4 Curva de retención de humedad

En un suelo saturado en equilibrio con agua libre a la misma elevación, la presión corresponderá a la atmosférica, en consecuencia la presión hidrostática y la succión (tensión) será cero.

Si una ligera succión, por ejemplo, una presión de agua ligeramente inferior a la atmosférica, es aplicada al agua en un suelo saturado, no habrá ninguna salida hasta que, la succión incremente, cuando cierto valor es excedido en el cual los poros más grandes comienzan a vaciarse. Esta succión crítica es llamada “succión de aire de entrada”. Su valor es generalmente pequeño en suelos con texturas gruesas y suelos agregados. Sin embargo, dado que en suelos más gruesos este fenómeno se presenta de manera más drástica e intensa que en suelos que texturas finas.

Cuando la succión es incrementada, más agua es drenada del suelo y más de los poros relativamente grandes y que no pueden tener agua en contra de la succión aplicada, serán vaciados. Retomando la ecuación de la capilaridad ($P=2/r$), podemos predecir fácilmente que ante un incremento gradual de la succión resultara en el progresivo vaciamiento de los poros más pequeños, hasta una dada succión máxima en la que solo los poros extremadamente pequeños retengan agua. Similarmente, el incremento en la succión del agua es asociada

con el decremento del grosor de la cobertura de hidratación y la superficie de las partículas de suelo. Una succión creciente es asociada con el decremento del contenido de humedad. La cantidad de agua remanente en el suelo en equilibrio es en función del tamaño y volumen de los poros llenos de agua y por lo tanto es una función de una succión matricial. Esta función es usualmente medida experimentalmente, y es representada gráficamente por una curva conocida como la curva de retención de humedad o la curva característica.

Hasta ahora, no existe una teoría satisfactoria para predecir la relación entre el potencial matricial y la humedad del suelo a partir de propiedades básicas. La absorción y el efecto del tamaño de los poros son generalmente muy complejos para ser descritas por un simple modelo. Varias ecuaciones empíricas han sido propuestas que aparentemente describen la curva característica para algunos suelos y en un rango muy limitado de succiones. (Daniel H. 1971)

2.1.4.1 Histéresis

La relación entre potencial matricial y humedad en el suelo generalmente no es única o de una sola variable. Esta relación puede ser obtenida de dos maneras: En desorción, tomando inicialmente una muestra saturada y aplicando una succión ascendente hasta secar gradualmente el suelo mientras se toma sucesivamente medidas del contenido de humedad contra succión; y (Guillermo C. 2000) en sorción, humedeciendo gradualmente una muestra seca de suelo mientras se reduce la succión. Cada uno de estos dos métodos nos da una curva de retención

de humedad, pero estas dos curvas generalmente no son iguales. El equilibrio de la humedad del suelo a una succión dada es mayor en la desorción (secándose) que en sorción (humedeciéndose). Esto dependerá del equilibrio de contenido y estado del agua en el suelo obedeciendo al sentido en la que el proceso es llevado es llamado histéresis. (Daniel H. 1971)

2.2 Técnicas de medición de humedad en el suelo

La necesidad de determinar la cantidad de humedad en el suelo es recurrente en muchas investigaciones hidrológicas. Esta información es requerida para entender el comportamiento, químico, mecánico e hidrológico del suelo, y la respuesta de las plantas ante estos. Existen métodos directos e indirectos para medir la humedad, y varias alternativas para expresar las cantidades. Sin embargo no existe un método reconocido universalmente ni tampoco una manera uniforme de computarlo y presentar los resultados.

La humedad en el suelo es generalmente representada como la relación entre masa del agua por masa de suelo seco o volumen de agua por volumen total del suelo. Estas relaciones son usualmente multiplicadas por 100 y reportadas como porcentaje de masa o volumen. (Daniel H. 1971)

2.2.1 Método gravimétrico

Este es el método más tradicional de medir la humedad en el suelo por masa y consiste en tomar una muestra y determinar su peso húmedo y seco

(después de secar la muestra en un horno a una temperatura constante de 105° C). La humedad gravimétrica (o humedad de masas) es la relación de pérdida de peso en el secado con el peso de la muestra seca (donde la masa y el peso son proporcionales), sin embargo, la relación de la masa con el contenido de humedad es utilizado. (Daniel H. 1971)

2.2.2 Sonda de contaste dialéctica

Uno de los más utilizados en la actualidad es el TDR; Time Domain Reflectometry. El principio teórico utilizado es que la velocidad con la que una microonda eléctrica atraviesa el suelo, entre dos barras metálicas introducidas en él, dependiendo de la constante dieléctrica K del material en contacto con ellas. El suelo está constituido por partículas minerales (K varía entre 2 y 3), aire (K =1) y agua (K=80). Como consecuencia de la gran diferencia del valor de K entre el agua y los otros componentes del suelo, la velocidad de la microonda depende principalmente del contenido hídrico existente. Su medida entre las dos barras metálicas permite determinar la cantidad de agua en el suelo.

2.2.3 Sonda de neutrones

Este método mide la velocidad de los neutrones emitidos por una fuente radioactiva, que son frenados cuando chocan con partículas de su mismo tamaño. El núcleo atómico más efectivo para frenarlos es el hidrogeno, que tiene aproximadamente su misma masa. Hay otros núcleos como el carbono, litio y

berilio que puede producir efectos semejantes, pero con menos efectividad por su mayor peso atómico y, además, no suele abundar en el suelo. De todos estos elementos el que se encuentra en mayor proporción es el hidrogeno, sobre todo como parte del agua y, en pequeña proporción de la arcilla y materia orgánica.

Para medir la humedad se coloca a cierta profundidad una sonda de neutrones para evitar que estos escapen a la atmosfera, y un contador que mide el flujo de los mismos en un cilindro hueco de aluminio que se ha introducido previamente en el suelo.

Este método presenta el inconveniente de necesitar una correcta calibración, así como un elevado precio y precauciones de manejo, para evitar problemas de radioactividad. Por estas razones solo se suele emplear por personal especializado de centros de investigación.

2.2.4 Tensiómetro

Es un aparato muy simple, constituido por un tubo lleno de agua unido por un lado a un manómetro por el otro, a través de una capsula porosa, al suelo.

Cuanto este no está saturado, la tensión del agua en el suelo y la de la columna alcanza el equilibrio, que se produce cuando el ϕ_P de la capsula es igual al ϕ_M del suelo. La lectura del manómetro nos permite conocer la tensión mátrica.

El diámetro de los poros de la citada capsula debe ser muy pequeño, con el fin que los efectos capilares no permitan que la tensión matricial pueda producir la salida del agua y el vaciado del aparato.

Teóricamente este aparato solo sirve para medidas entre 0 y 1 atmosfera, ya que para mayores tensiones se descargaría todo el agua y entraría aire. En la práctica, debido a las perdidas, no permite medir valores mayores de 0.8 atmosferas. Por ello es muy empleado en riego de alta frecuencia, generalmente localizado, donde la reposición continua del agua consumida permita pequeñas tensiones matriciales en el suelo. (Guillermo C. 2000)

2.2.5 Sensor de humedad resistivo

En un bloque de poroso está en contacto con el suelo estos se equilibran de manera que los cambios en las propiedades eléctricas o termales del bloque están en relación con el suelo que los rodea. Esto es, el bloque adquiere un contenido de humedad similar al del suelo que lo rodea. El principio de medición se basa en que la cantidad de agua en el bloque puede ser estimada por la resistencia generada al paso de una corriente eléctrica entre dos electrodos insertados en el material poroso, usualmente hecho de yeso. La resistencia al flujo de electrodos está relacionada con el contenido de humedad. A mayor contenido de humedad, menor es la resistencia al paso de una corriente eléctrica. Los electrodos consisten de dos mallas formadas por una serie de alambres paralelos. Es posible

generar curvas que relacionen la resistencia eléctrica del bloque con el contenido de humedad. (Waldo O. 2000)

2.3 Redes de sensores inalámbricos en la agricultura

La agricultura es una de las actividades ancestrales del hombre en la cual la tecnología e innovación son usualmente aceptadas con dificultad, a menos que se encuentren soluciones reales e inmediatas para problemas específicos que resulten en una mayor producción y calidad, sin embargo, nuevos enfoques para recabar información de la nube ambiental están representando avances en agricultura de alta calidad y eco-sustentable.

En la actualidad, el manejo del riego, fertilizantes y pesticidas es usualmente dejado a la discreción de los productores y agrónomos: el criterio común para garantizar un buen cultivo y crecimiento de la planta es darle un poco más de agua y fertilizante de la necesaria. No hay una relación directa entre la decisión de tratar o regar las plantas y los efectos reales en el campo. Las condiciones de la planta usualmente entregadas por una esporádica y retirada estación climatológica que no puede proveer mediciones locales y precisas de los parámetros fundamentales de cada zona del campo. También, modelos agronómicos, basados en esta información monitoreada, no pueden proveer información de confianza. Al contrario, la agricultura necesita de un monitoreo detallado para obtener en tiempo real una retroalimentación entre las plantas, las

condiciones climáticas locales y las decisiones del hombre. (Geoff V. M., Yen K. T. 2010).

2.3.1 Agricultura de precisión

El concepto de agricultura de precisión ha estado rondando por un periodo considerable de tiempo. Blackmore et al., 1994 (Blackmore, 1994) la define como un sistema integral diseñado para optimizar la producción agrícola mediante el entallado manejo del suelo y el cultivo con sus correspondientes condiciones únicas encontradas en cada predio, mientras se mantiene una calidad ambiental. Los pioneros de ese tiempo encontraron a la agricultura de precisión como no rentable y los casos en las que fue implementada fueron pocos y distantes. (Geoff V. M., Yen K. T. 2010)

El término “Agricultura de precisión” es definido como la aplicación de varias tecnologías y principios para el manejo espacial y temporal de la variabilidad asociada con todos los aspectos de la producción agrícola. (Pierce y Nowak, 1999). Las prácticas agrícolas convencionales siempre han seguido un manejo estándar para una gran superficie indiferentemente a la variabilidad presente a lo largo y ancho del terreno. Desde hace décadas, los agricultores han estado aplicando fertilizantes en base a recomendaciones emitidas por los investigadores y pruebas de campo realizadas bajo condiciones agroclimáticas muy específicas (Ladha et al. 2000). Las aplicaciones de insumos agrícolas en lapsos uniformes por largos periodos de tiempo sin tomar en cuenta la variabilidad de terreno ni las

propiedades del cultivo o el suelo, dan un rendimiento no deseado. Considerando la variabilidad del terreno en cuanto a fertilidad y las condiciones del cultivo, acompañando a los insumos agrícolas como las semillas, fertilizantes, el riego, insecticidas, pesticidas, etc. para optimizar los insumos o maximizar el rendimiento del cultivo para una cantidad dada de insumos, a esto se refiere la agricultura de precisión. Es un sistema agrícola, basado en la información e impulsado por la tecnología, diseñado para mejorar los procesos agrícolas mediante el monitoreo preciso de cada paso para asegurar la máxima producción agrícola con el mínimo impacto ambiental. Conlleva el ajuste de los parámetros de siembra, la dosificación e los fertilizantes, aplicación específica del agua, pesticidas y herbicidas, etc. (Adams et al., 2000). Las granjas de riego respaldadas por la estimación de los requerimientos de agua es uno de los componentes esenciales de la agricultura de precisión para reducir las pérdidas de agua. Dadas las limitantes del recurso agua, la optimización de las eficiencias de riego es muy esencial. (Manish K. 2012)

2.3.2 Riego de precisión

El agua juega un rol crucial en la fotosíntesis y nutrición de la planta. El problema del manejo del agua en la agricultura al día de hoy es altamente reconocido como el mayor reto a enfrentar, usualmente ligado a problemas de desarrollo. La agricultura consume el 70% del agua dulce, p.e. 1,500 billones de m³ de los 2,500 billones de m³ de agua son usados cada año (Godwin y

O'Connell 2008). También se estima que el 40% del agua dulce usada para la agricultura en países en desarrollo se pierde, ya sea por evapotranspiración, fugas, o filtración a las capas más profundas del suelo, más allá del alcance de las raíces de las plantas (Panchard et. al., 2007). Pasada la era de la revolución verde en India, se está enfrentando una fatiga tecnológica por dos razones: a) Altos índices de abatimiento de los acuíferos y b) salinidad en suelos debido al riego excesivo en algunos puntos. La eficiencia del manejo del agua es una de las mayores preocupaciones en muchos sistemas de cultivo. Cada vez más y más administradores así como granjeros están tomando mayor conciencia acerca de la auditoria del agua y la eficiencia del uso del agua debido a la que el recurso agua cada vez se está volviendo más escasa. Esfuerzos por utilizar métodos como la micro irrigación ya sea goteo o aspersión se han realizado durante las últimas tres décadas en diversas partes del mundo. No existe un método ideal para irrigar que aplique para cualquier condición climática, estructura del suelo y variedad de cultivos. En las áreas semidesérticas de países subdesarrollados, los granjeros marginados y los pequeños agricultores (que poseen entre 2 y 4 hectáreas) quienes no pueden costear por sistemas de riego tecnificados, dependen mayormente de la agricultura de temporal para el desarrollo de sus cultivos. Se ha observado que los agricultores tienen grandes pérdidas financieras debido a la mala predicción del clima y las incorrectas formas de irrigar. A la luz de una necesidad real de mejorar la eficiencia de los sistemas de riego y prevenir el mal uso del agua, el foco es desarrollar un sistema inteligente de calendarización del

riego que permita a los agricultores optimizar el uso del agua y solo regar donde y cuando lo necesiten el tiempo necesario.

El riego de precisión es un nuevo concepto mundial en la irrigación. El riego de precisión envuelve la aplicación precisa y acertada del agua, conociendo los requerimientos individuales de las plantas o las unidades de manejo y minimizando el impacto ambiental. Una definición de riego de precisión es el manejo sustentable del recurso agua que envuelve la aplicación de agua al cultivo en el tiempo preciso, en justa cantidad, en el lugar correcto y de la manera adecuada, así ayudando a la sustentabilidad del recurso agua.

2.3.3 Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos o WSN por sus siglas en inglés, es una red de pequeños dispositivos de censado, conocido como nodos o puntos, distribuidos y estructurados de cierta manera, en la cual colaboran los unos con los otros para enlazar, procesar y comunicar mediante un canal inalámbrico acerca de un fenómeno físico.

Los nodos son comúnmente de bajo costo, bajo consumo energético, de tamaño pequeño con una capacidad limitada de censado, procesamiento de datos y comunicación inalámbrica.

Un sensor inalámbrico es una unidad de cómputo auto alimentada que usualmente contiene una unidad de procesamiento, trans-receptor e interfaces

análogas y digitales, con las cuales una gran variedad de unidades de censado pueden ser adaptadas, tales como temperatura, humedad, etc. Los nodos de sensores se comunican uno con otro para intercambiar y procesar información colectada por las unidades de censado.

Cuando los nodos se comunican única y directamente con otros nodos o con una estación base, se conoce como una red de un solo salto (single-hop). En algunos casos, los nodos pueden usar a otros como enlaces para comunicarse con la estación base en cuyo caso se hace llamar a la red como multi-salto (multi-hop). En el modelo de adquisición de datos, los nodos puede comunicarse con una o varias estaciones base, que a su vez se conectan con una base de datos o un servidor el cual almacena la información y realiza un procesamiento extra de la información. El resultado generalmente se muestra mediante una interfaz web.

Una red inalámbrica tiene gran potencial para representar la variabilidad inherente del suelo presente en el campo, con más exactitud que los sistemas actuales disponibles. Las RIS pueden operar en un amplio rango de ambientes y proveen ventajas en costo, tamaño, precio, consumo de energía, flexibilidad y distribución de la inteligencia, comparadas con las redes cableadas. Los sensores inalámbricos son lo suficientemente baratos para desplegarse en una topología tipo malla, también ofrecen una comunicación robusta a través de trayectos de propagación redundantes. (Manish K. 2012)

2.3.4 Otras aplicaciones

Los sistemas de sensores inalámbricos tienen muchas aplicaciones dentro de todos los aspectos de la vida moderna, una que resalta por su impacto en la vida social de las comunidades es la implementación de estas tecnologías para el monitoreo de eventos meteorológicos con el fin de prevenir desastres tales como inundaciones.

Dichos acontecimientos provocados por fenómenos meteorológicos extraordinarios han afectado diferentes regiones de la República mexicana, haciendo del interés de instituciones públicas y privadas el contar con herramientas que nos permitan si bien no evitar, por lo menos disminuir el daño y las afectaciones que puedan acarrear.

Una de estas herramientas es la llamada Sistema de Alerta Temprana cuya función es la coordinación en el alertamiento de la población y la acción institucional, ante amenazas provocadas por fenómenos naturales, que se sustenta en el actuar de los principales actores del sistema nacional de protección civil.

El funcionamiento del sistema conforma muchas partes, pero la más importante para el objeto de esta tesis es la de obtención y medición de parámetros climáticos y ambientales que nos permiten identificar valores de alerta que disparan las acciones de los diferentes entes.

Por ejemplo, en un fenómeno de alta precipitación los valores más importantes a censar sería el nivel de precipitación. Para ello se cuenta con estaciones meteorológicas distribuidas en diferentes puntos de la localidad o región en cuestión, que a su vez transmiten la información para su procesamiento a un centro de control.

Sin embargo con un sistema de sensores inalámbricos se pudiera aumentar el número de puntos de muestreos a lo largo de una localidad o región aumentando la precisión y alcance de la información permitiendo un actuar más acertado y eficiente dirigiendo los recursos hacia donde tengan mayor demanda y logrando así un ahorro.

Este tipo de sistemas también se utiliza en la prevención de incendios forestales, implementando sensores a lo largo de un área forestal los cuales monitorean constantemente la calidad del aire para determinar si existen valores que puedan alertar sobre un incendio y de igual manera activar las acciones requeridas en caso de emergencia.

El constante flujo de información de estos sistemas también permite la creación de modelos matemáticos que nos ayuden a entender y prevenir dichos fenómenos.

III. Materiales y métodos

3.1 Componentes del sistema

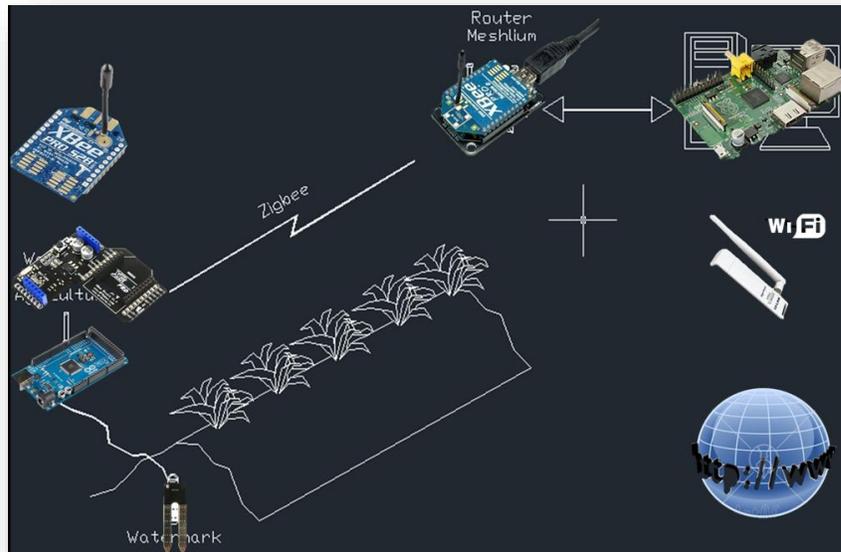


Figura 1. Diagrama de componentes del sistema

3.1.1 Placa microcontroladora

En vez de armar un sistema embebido para la comunicación entre el sensor de humedad y el módulo de comunicación Xbee, se optó por utilizar una tarjeta de desarrollo de prototipos electrónica debido a: bajo costo, amplia versatilidad, facilidad de uso y programación, gran documentación y soporte existente, y por supuesto disponibilidad en el mercado.

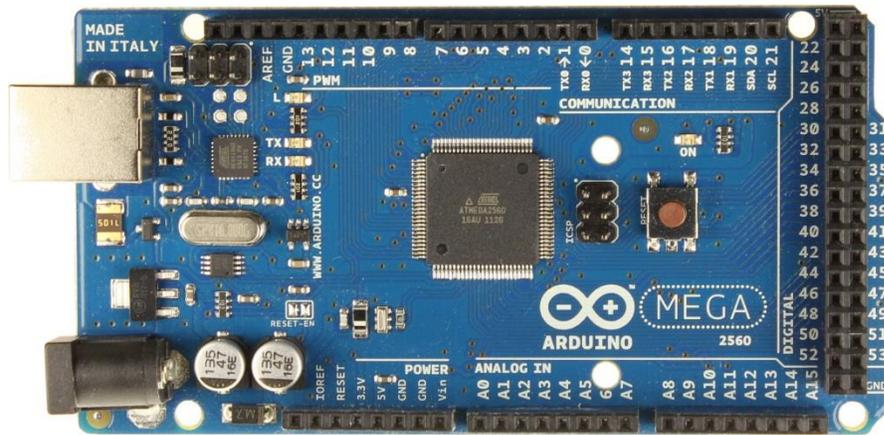


Figura 2. Placa arduino mega 2560

Hay un variedad considerable de este tipo de tarjetas, en un principio su nicho era el de aficionados a la electrónica y robótica, pero no tardaron en popularizarse y la gente les encontró diversidad de utilidades, ya que permiten a personas con conocimientos básicos realizar proyectos muy complejos, que van desde automatización de procesos (Impresoras 3D, automatización de invernaderos, Cortadoras CNC) hasta procesamiento de imágenes (reconocimiento facial).

En este proyecto se utilizó una Arduino Mega 2560, placa de desarrollo de prototipos electrónicos basada en un micro controlador ATmega2560. Esta tiene 54 pines de entrada/salidas digitales (de los cuales 14 pueden ser utilizados como PWM), 16 pines análogos, 4 puertos UARTs (puertos seriales), un cristal oscilador de 16MHz, una conexión USB, entrada de corriente, pines ISCP y botón de reinicio.

Cuadro 1. Resumen de especificaciones, Arduino Mega2560

Microcontrolador	ATmega1280
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines E/S digitales	54 (14 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Intensidad por pin	40 mA
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	128 KB de las cuales 4 KB las usa el gestor de arranque(bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

3.1.1.1 Xbee Shield

Por si sola la Arduino Mega 2560 no dispone de comunicación inalámbrica, sin embargo existen extensiones para arduino conocidas como Shields, que consisten en placas electrónicas impresas que se conectan en la parte superior del Arduino y permiten agregar más funcionalidades, en este caso, la comunicación a través de un módulo Xbee.

La Xbee shield permite a una placa Arduino comunicarse de forma inalámbrica usando Zigbee. Está basada en el módulo Xbee de MaxStream. El módulo puede comunicarse hasta 100ft (30 metros) en interior o 300ft (90 metros) al aire libre (en visión directa). Puede ser usado como reemplazo del puerto serie/usb o puedes ponerlo en modo de comandos y configurarlo para una variedad de opciones de redes broadcast o malladas. La shield tiene pistas desde

cada pin del Xbee hasta un orificio de soldar. También provee conectores hembra para usar los pines digitales desde 2 hasta 7 y las entradas analógicas, las cuales están cubiertas por la shield (los pines digitales de 8 a 13 no están cubiertos por la placa, así que puedes usar los conectores de la placa directamente).

La Xbee shield fue creada en colaboración con Libelium, quienes la desarrollaron para usarlo en sus SquidBee motes (usados para crear redes de sensores).

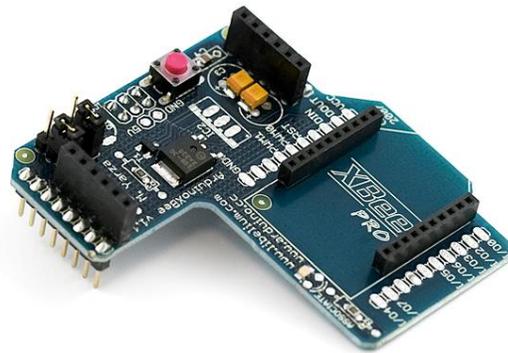


Figura 3. Xbee shield

3.1.2 Sensor de humedad

Se utilizó un sensor análogo de la compañía DFRobot (China) el cual se basa en el principio de la constante dieléctrica del suelo (capacitancia). El sensor carece de una calibración de fábrica por lo cual fue necesario realizar diferentes pruebas para su caracterización, es decir relacionar los valores de voltaje de salida con el contenido de humedad en el suelo.



Figura 4. Sensor de humedad del suelo DFRobot

Por ser un sensor de baja tecnología carece de hoja técnica, pero la página web del fabricante lista las siguientes especificaciones:

Cuadro 2. Especificaciones, sensor de humedad del suelo DFRobot

Corriente de alimentación:	3.5V o 5V
Voltaje de señal de salida:	0~4.2V
Corriente:	35mA
Definición de pines:	1 - Salida analoga (Cable azul)
	2 - GND (Cable negro)
	3 - Alimentación (Cable Rojo)
Tamaño:	60x20x5mm
Rango de Valores:	0 ~ 300 - Suelo seco
	300 ~ 700 - Suelo humedo
	700 ~ 950 - En agua

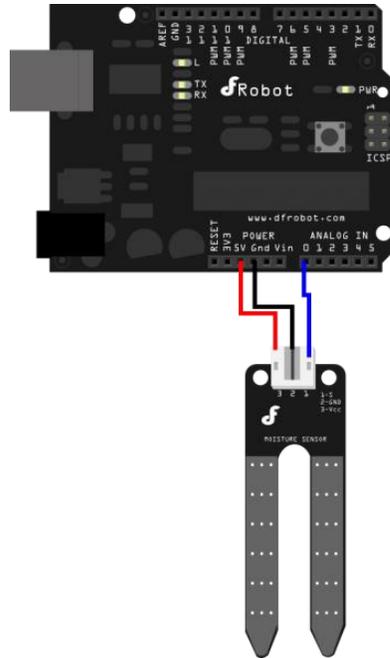


Figura 5. Diagrama de conexión del sensor de humedad

3.1.3 Protocolo de comunicación, Zig-Bee

Para la comunicación entre el nodo sensor y el adquisidor de datos, se optó por un protocolo muy utilizado en sistemas de redes inalámbricas, llamado Xbee, el cual presenta grandes ventajas como el ahorro de energía y el modo de hibernación en los sensores cuando estos no estén trabajando.



Figura 6. Módulo Xbee-pro

En sistemas más desarrollados este tipo de protocolos permite tener nodos sensores en campo con celdas solares los cuales pueden permanecer años en funcionamiento sin que se requiera una intervención del hombre para realizar mantenimientos.

Otra de las ventajas de este tipo de protocolo frente a otros, es la diversidad de topologías de red que se pueden estructurar, si bien en el presente proyecto no se le puede llamar una red ya que solo consta de un solo nodo sensor, esta característica es importante frente a trabajos futuros que se puedan realizar en esta misma área.

El sistema consta de dos módulos Xbee, uno conectado a la tarjeta Arduino Mega 2560 y otro conectado al adquisidor de datos (Raspberry Pi), en el primer caso, la conexión se realizó con un Xbee Shield. La conexión con el adquisidor de datos se realizó mediante los puertos genéricos o GPIO (General Purpose Input/Output) por sus siglas en ingles.

3.1.4 Adquisidor de datos

Debido al bajo presupuesto del proyecto y acorde al objetivo de desarrollar una plataforma económica, se optó por no comprar un sistema comercial de adquisición de datos, en cambio se desarrolló uno, partiendo de una mini computadora llamada Raspberry Pi.

La Raspberry Pi es una computadora del tamaño de una tarjeta de crédito, puede conectarse a un televisor y a un teclado, tiene todas las capacidades de una computadora personal, además de que reproduce video de alta definición. Su objetivo primordial es la enseñanza de programación a niños; una de sus características más impresionantes es su precio, el cual es de tan solo \$35 dólares estadounidenses.

Independientemente de su objetivo principal que es la formación, esta pequeña computadora cuenta con una serie de puertos genéricos que le permite una interacción con el mundo físico, lo que se conoce como Computación física; esta interacción se logró con un segundo módulo Xbee.



Figura 7. Mini computadora Raspberry Pi

Se instaló el sistema operativo Raspbian, el cual es una variante de Debian desarrollado por los creadores de la computadora y especialmente creado para funcionar con el hardware de la computadora, ambos parten del Kernel de Linux, es decir que son de código abierto y completamente gratuito.

Cuadro 3. Especificaciones, RaspberryPi Modelo B

SoC:	Broadcom BCM2835 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + puerto USB) ³
CPU:	ARM1176JZF-S a 700 MHz (familia ARM11) ³
GPU:	Broadcom VideoCore IV, ⁵⁹ OpenGL ES 2.0, -2 y VC-1 (con licencia), ⁵⁷ 1080p30 H.264/MPEG-4 AVC ³
Memoria (SDRAM):	512 MB (compartidos con la GPU)
Puertos USB 2.0:	2 (vía hub USB integrado) ⁵²
Salidas de vídeo:	Conector RCA (PAL y NTSC), HDMI (rev1.3 y 1.4), Interfaz DSI para panel LCD ^{61 62}
Salidas de audio:	Conector de 3.5 mm, HDMI
Almacenamiento integrado:	SD / MMC / ranura para SDIO
Conectividad de red:	10/100 Ethernet (RJ-45) via hub USB ⁵²
Periféricos de bajo nivel:	8 x GPIO, SPI, I ² C, UART ⁵⁹
Reloj en tiempo real:	Ninguno

Consumo energético:	700 mA, (3.5 W)
Fuente de alimentación:	5V vía Micro USB o GPIO header
Dimensiones:	85.60mm x 53.98mm63 (3.370 x 2.125 inch)
Sistemas operativos soportados:	Debian, Fedora, Arch Linux, Slackware Linux, RISC OS2

3.1.5 Interfaz de usuario

Para la interfaz de usuario se optó por una plataforma muy sencilla que funciona desde Internet, lo que permitirá dar seguimiento a la información desde cualquier lugar y con cualquier dispositivo capaz de acceder a la red.

Xively servicios en la nube es una plataforma como servicio del internet de las cosas que

3.2 Calibración del sistema

Para la calibración se siguió un procedimiento general para sensores capacitivos propuesto por Starr and Paltineanu (2012).

Materiales y equipo:

1. Pala y contenedor – para la recolección de la muestra y el secado de la misma.
2. Contenedor de calibración. El contenedor de calibración debe permitir compactar el suelo a la misma densidad a la que mantenía en su estado inalterado y además permita acomodar el sensor en la totalidad de sus dimensiones, dejando unos centímetros libres con el

fondo del contenedor y la superficie. Es mejor si el contenedor es de un material rígido y que permita un fácil acceso a la superficie de la muestra.

3. Sensor de humedad y sistema de adquisición de datos, los sensores de una misma marca dan una lectura similar así que es posible aplicar una sola calibración para todos los sensores.

Se debe de utilizar el sistema de adquisición de datos que se va a implementar en campo.

4. Muestreador volumétrico del suelo – Para llevar a cabo la calibración del sensor se debe de contar con este tipo de muestreador, el cual se utiliza para recolectar muestras de volumen conocido sin alterar la densidad aparente.

5. Contenedores para el secado del suelo

El contenedor de secado puede ser cualquier contenedor que pueda introducirse a un horno de secado y de preferencia que tenga una tapa.

Se debe de medir la masa de cada una de los contenedores, estado estos limpios, secos y antes de agregar el suelo. Esto es lo que se conoce como peso de tara.

6. Balanza – La balanza debe de contar con una precisión mínima de 0.01 g

7. Horno de secado – Cualquier horno que pueda mantener una temperatura relativamente estable de entre 105 a 110 °C.

1. Recolección del suelo

- 1.1. Colectar aproximadamente 4 litros de suelo.
- 1.2. Asegurarse de que el suelo sea del área y profundidad en la que se desea instalar el sensor de humedad.
- 1.3. De ser posible se debe de medir la densidad aparente del suelo cuando se colecta la muestra.
 - 1.3.1. Utilizar el muestreador volumétrico del suelo para tomar varias muestras.
 - 1.3.2. Se debe de conocer el volumen del muestreador (V_{suelo}).
 - 1.3.3. Secar al horno las muestras y medir la masa del suelo seco. (m_{seca}).
 - 1.3.4. Utilizar la ecuación 4 para calcular la densidad aparente del suelo.

2. Preparación del suelo

- 2.1. Se debe secar al aire libre el suelo. El secado se hace de manera más rápida si se esparce en una capa delgada y se aplica una corriente de aire sobre la misma.
- 2.2. Remover los objetos grandes del suelo
- 2.3. La presencia de rocas grandes u otros objetos puede complicar el proceso de calibración. Se sugiera romper los terrones grandes y tamizar el suelo por una malla de entre 2 a 5 mm antes de seguir el procedimiento.

3. Calibración

3.1. Poner el suelo en el contenedor de calibración aproximándose lo más posible a la densidad aparente en campo.

3.1.1. Si se comienza con el suelo seco, se puede controlar la densidad aparente compactando una masa de suelo en un volumen del contenedor.

3.1.2. Generalmente es necesario agregar el suelo por capas, compactando cada capa antes de agregar la siguiente.

3.2. Insertar el sensor, es importante de que el sensor quede ajustado y que no queden espacios de aire entre la superficie del sensor y el suelo.

3.2.1. Insertar el sensor completamente en el suelo, esto incluye la parte de plástica protectora de los componentes eléctricos, si no es posible insertarlo completamente, insértelo lo más posible y agregue suelo para cubrirlo y de ser posible algunos centímetros de cable también.

3.3. Tomar lectura del sensor, asegurarse de que el sistema de adquisición de datos este dando la excitación necesaria (voltaje).

3.4. Colectar la información bruta del sensor (sin calibración).

3.4.1. Es aconsejable repetir los pasos desde la inserción del sensor hasta la toma de muestras dos o tres veces para asegurarse de que se estaba obteniendo una inserción de calidad. Generalmente habrá una pequeña variación (algunos mV), así que se deberá de tomar el promedio de las medidas.

3.5. Colectar una muestra volumétrica del suelo.

3.5.1. Sin remover el sensor, insertar el muestreador de suelo volumétrico completamente en una parte de suelo sin alterar cerca del sensor.

3.5.2. Remover el muestreador asegurándose de mantener el suelo dentro del mismo, quitar el exceso de suelo del extremo final y colocar la muestra en el contenedor de secado y taparlo. Cualquier pérdida de agua desde el muestreo hasta el momento del pesado introduce un error de cálculo de contenido volumétrico de agua.

3.5.3. Repetir el muestreo volumétrico del suelo por lo menos una vez para disminuir la variabilidad espacial de la muestra.

3.5.4. Pesar la masa del suelo húmedo más el contenedor y anotarlo en la cuadro de recolección de datos.

3.6. Humedecer la muestra de calibración

3.6.1. Agregar 1 mL de agua por cada 10 mL de volumen de suelo (incrementar el contenido volumétrico de agua en un 10%). Ir humedeciendo el suelo de la manera más rápida posible.

3.6.2. Mezclar la muestra con las manos o con una espátula hasta que obtener una consistencia uniforme.

3.7. Repetir los pasos del 3.1 al 3.8 hasta que el suelo alcance un estado de saturación. Esto generalmente general de 4 a 6 puntos de calibración. La densidad aparente de la muestra puede mantenerse durante el proceso de

calibración al compactar el suelo al mismo nivel en el contenedor de calibración en cada contenido de humedad.

3.8. Secar las muestras volumétricas del suelo.

3.8.1. Colocar todas las muestras ya pesadas en un horno a 105 ° C por 24 horas.

3.8.2. Nótese que los suelos con altos contenidos de materia organica pueden presentar un perdida significativa de organismo volátiles si se seca a 105° C, resultando en un error de calibración. Se recomienda para este tipo de suelos secarlos a una temperatura de 30° o 70° C durante por lo menos 48 horas.

3.9. Pesado de la muestras de suelo seco

3.9.1. Remover los contenedores de las muestras del horno

3.9.2. Pesar las muestras junto con el contenedor

3.9.3. Registrar el valor en la Cuadro 4.

Cuadro 4. Ejemplo de formato de colección de datos para la calibración del sensor

No. muestra	Lectura del sensor (mV)	Peso de tara del contenedor (g)	Volumen de la muestra (cm ³)	Masa suelo húmedo + Contenedor (g)	Masa del suelo seco + contenedor (g)	Masa y volumen de agua (cm ³)	Masa del suelo seco (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Contenido Volumétrico de agua (cm ³ /cm ³)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

4. Cálculos

El contenido de humedad volumétrico o gravimétrico es la relación del volumen de agua por el volumen de suelo.

$$\theta = V_w/V_t$$

Dónde:

Θ = Contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3)

V_w = Volumen del agua (cm^3)

V_t = Volumen total de la muestra del suelo (cm^3)

Para encontrar V_w , debemos calcular el volumen del agua que se pierde durante el secado en el horno.

$$m_w = m_{wet} - m_{dry}$$

$$V_w = m_w/\rho_w$$

Dónde:

m_w = Es la masa de agua

m_{wet} = Es la masa del suelo húmedo (g)

m_{dry} = Es la masa del suelo seco

ρ_w = Densidad del agua ($1\text{g}/\text{cm}^3$)

Adicionalmente al contenido volumétrico de agua, la densidad de la muestra del suelo también puede ser calculada. La densidad aparente (ρ_b) es definida como la densidad del suelo seco (g/cm^3):

$$\rho_b = m_{dry}/V_{soil}$$

La lectura del sensor de humedad no es muy sensitiva a pequeñas diferencias de densidad aparente. Sin embargo, si la densidad aparente durante la calibración es radicalmente diferente de la existente en el suelo a muestrear, tendremos error en nuestra calibración. Si se muestrea la densidad aparente como lo descrito en el punto 1.3, podemos controlar la densidad aparente en el contenedor de calibración. Si no compactamos la muestra a la densidad aparente conocida y la densidad en campo es diferente a la del procedimiento de calibración en alrededor de un 20 % de diferencia, se debe de repetir el procedimiento de calibración para obtener una densidad aparente más realista.

5. Encontrar y utilizar la función de calibración

Los cálculos anteriores se hicieron en un programa de hojas de cálculo, encontrar la función de calibración es fácil. Simplemente se creó un gráfico ubicando los datos de salida del sensor en el eje de las X, y el contenido volumétrico de agua en el eje de las Y. Después simplemente se agregó la línea de tendencia para construir un modelo matemático de la relación de dichos factores. Esta relación es comúnmente lineal, pero en algunos casos, como en este se ajusta mejor una ecuación cuadrática.

3.3 Instalación y demostración del sistema

La instalación del sistema es simple, para el nodo sensor únicamente se requiere conectar el adaptador de corriente e insertar el sensor de humedad en el suelo a la profundidad deseada. Por otra parte, en un rango de 200m, debe de encontrarse el colector de datos para poder establecer la conexión inalámbrica. El colector de datos debe configurarse para tener acceso a internet una sola vez, solo si el administrador de la red modificase parámetros de seguridad y/o acceso, sería necesario reconfigurar los la valores.

En este experimento, la instalación del sensor fue a una profundidad de 15 cm, en un recipiente plástico con un suelo franco, dicho suelo fue saturado de agua, por lo que se pudo observar la disminución gradual de humedad.

El sistema estuvo en funcionamiento tres días, no mostrando fallos del sistema, como único inconveniente se presentaron cortes en el servicio de internet inesperados, debidos a fallas en la infraestructura de la institución.

En la Figura 8 se observa como son los datos de salida del sistema, dicho archivo cuenta con la extensión “.csv”, valores separados por comas por su traducción de las siglas en ingles. Esta extensión puede ser manipulado por cualquier software de hojas de cálculo, en este caso se utilizó Excel de la Suite de Microsoft Office. En las columnas A, B, C, y D se presenta el año, mes, día, hora y mini volts, que son los datos de salida del sistema. En la columna F se presenta el contenido volumétrico de humedad, resultado de la ecuación de calibración.

	A	B	C	D	E	F	G	H
819	2013	6	14	13:56	814	0.89402117		
820	2013	6	14	13:58	830	0.90120203		
821	2013	6	14	14:00	823	0.89805333		
822	2013	6	14	14:02	825	0.89895184		
823	2013	6	14	14:06	827	0.89985124		
824	2013	6	14	14:08	828	0.90030128		
825	2013	6	14	14:10	826	0.89940142		
826	2013	6	14	14:12	817	0.89536321		
827	2013	6	14	14:14	839	0.90526658		
828	2013	6	14	14:16	859	0.91436466		
829	2013	6	14	14:18	829	0.90075154		
830	2013	6	14	14:20	812	0.8931276		
831	2013	6	14	14:22	828	0.90030128		
832	2013	6	14	14:26	825	0.89895184		
833	2013	6	14	14:28	819	0.89625902		
834	2013	6	14	14:30	815	0.8944683		
835	2013	6	14	14:32	821	0.89715573		
836	2013	6	14	14:34	858	0.91390759		
837	2013	6	14	14:40	830	0.90120203		
838	2013	6	14	14:42	823	0.89805333		
839	2013	6	14	14:44	826	0.89940142		
840	2013	6	14	14:46	792	0.88424083		
841	2013	6	14	14:48	830	0.90120203		
842	2013	6	14	14:50	806	0.89045223		
843	2013	6	14	14:52	816	0.89491564		

Figura 8. Captura de pantalla de registro de datos en Excel

La ventaja de poder utilizar un software de hojas de cálculo, recae en la posibilidad de analizar y presentar la información de una manera sencilla y que casi todos dominamos. Podemos realizar filtros a la información para obtener solo los datos requeridos, en la Figura 9, por ejemplo, se muestra un gráfico realizado con Excel de los datos tomados el 14 de Junio del 2013, en el rango de la 13:00 horas a las 17:00 horas, donde fácilmente se ve la disminución de los valores de humedad del suelo.

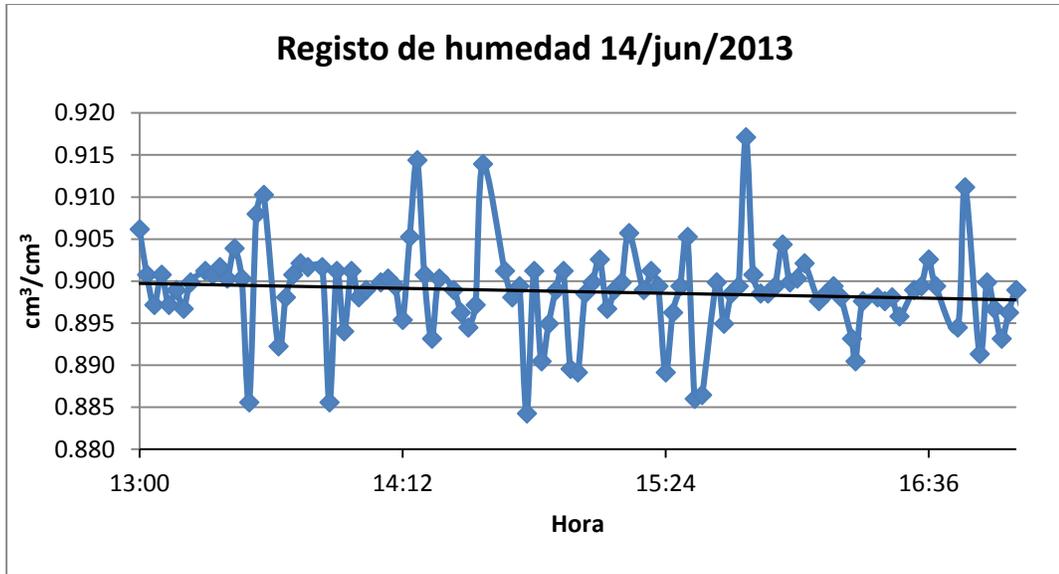


Figura 9. Graficación de datos en hoja de cálculo en Excel.

En la Figura 10, se muestra una captura de pantalla de la plataforma Xively, la cual nos permite darle seguimiento al dato de salida del sistema vía Internet. Se puede acceder a la misma desde cualquier dispositivo, ya sea una computadora, teléfono inteligente o tableta, solo accediendo a la dirección URL o web proporcionada. La plataforma Xively también nos permite realizar gráficos básicos de los datos de salida, en diferentes rangos de tiempo, por ejemplo: 5 min, 30 min, 1 hr, 6 hr, 1 día, etc.

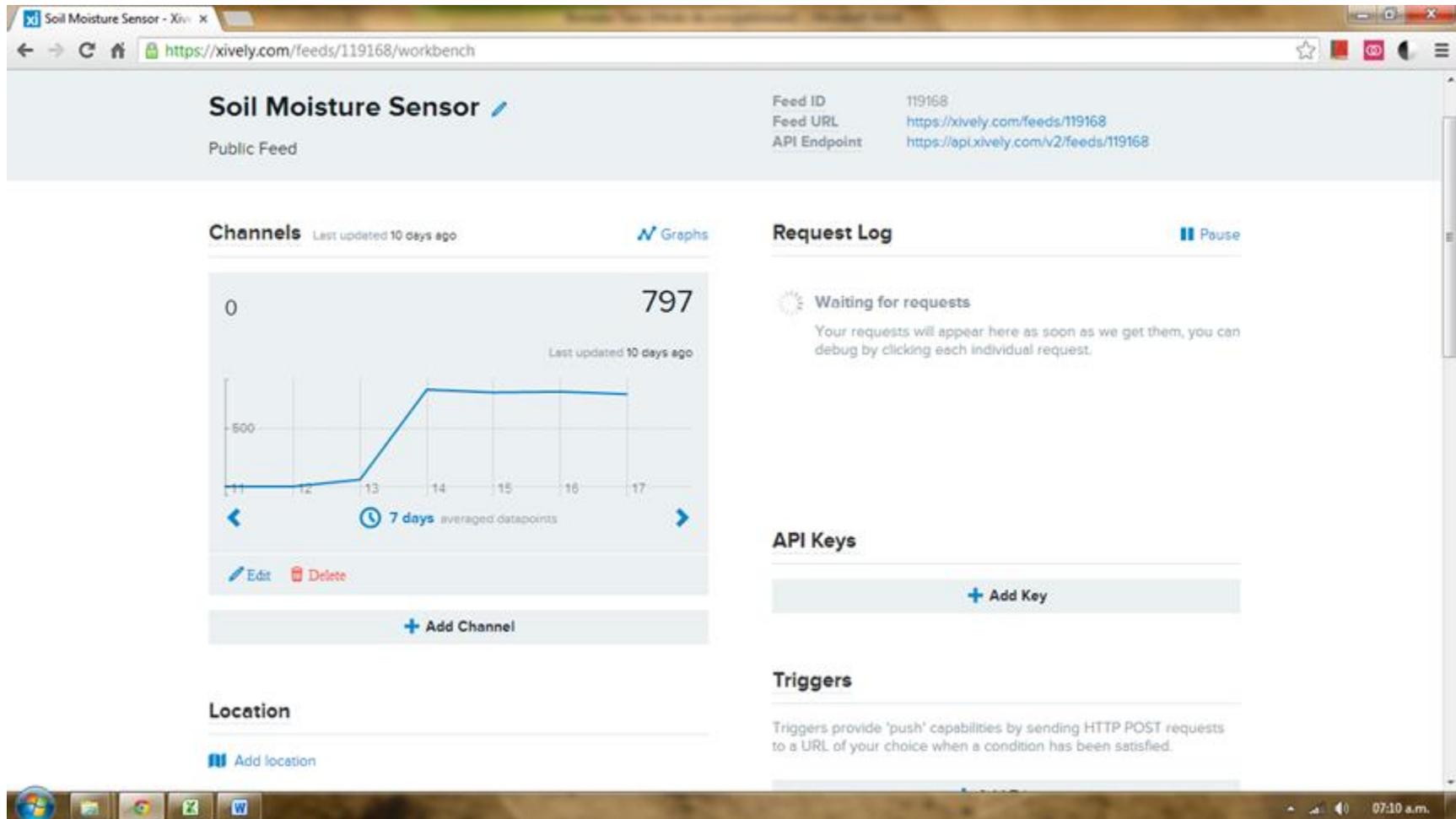


Figura 10. Captura de pantalla de registro de datos en la plataforma Xively

IV. Resultados

Del procedimiento de calibración se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en el Cuadro 5. Resultados del procedimiento de calibración del sensor, dicho procedimiento se realizó en el “Laboratorio de relación agua, suelo” perteneciente al Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Cuadro 5. Resultados del procedimiento de calibración del sensor

Número de muestra	Lectura del sensor (mV)	Peso de tara del contenedor (g)	Volumen de la muestra (cm ³)	Masa Suelo húmedo + Contenedor (g)	Masa del suelo seco + contenedor (g)	Masa y volumen de agua (cm ³)	Masa del suelo seco (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Contenido Volumétrico de agua (cm ³ /cm ³)
1	0	20,850	10,000	53,200	53,199	0,001	32,349	1,49	0,0001
2	570	21,340	10,000	58,960	57,873	1,087	36,533	1,54	0,1087
3	640	20,050	10,000	61,226	59,800	1,426	39,750	1,52	0,1426
4	735	19,800	10,000	63,016	61,440	1,576	41,640	1,58	0,1576
5	770	19,790	10,000	64,367	62,356	2,011	42,566	1,61	0,2011
6	820	19,850	10,000	66,471	64,178	2,293	44,328	1,55	0,2293

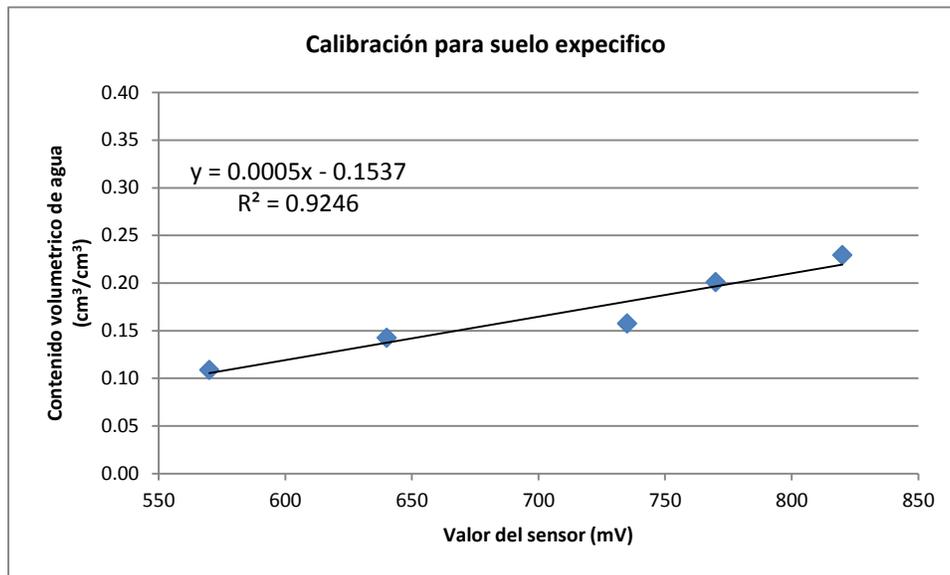


Figura 11. Datos de salida y ecuación de calibración

V. Conclusiones

La calibración del sistema y su demostración en campo deja en claro que este tipo de herramienta es muy funcional, se cumplió satisfactoriamente con los objetivos planeados en un inicio y se dejó un buen precedente para futuras investigaciones en el tema.

Sin embargo un aspecto que destaca es la sensibilidad del sensor de humedad, ya que la calibración demuestra que para el tipo de suelo, el utilizado en este proyecto, no existe un comportamiento lineal en la relación voltaje-humedad del suelo, lo que indica que el sensor pierde sensibilidad a bajos contenidos de humedad.

La interfaz con la cual se presentan la información en internet, facilita en gran medida el seguimiento de las variables medidas, y apoya con información en tiempo real para la toma de decisiones.

La adaptabilidad del sistema dio pie a que se extendiera las capacidades del mismo, siendo que para la demostración en campo se incluyera un sensor de temperatura y humedad relativa, que si bien no se abordan los detalles en este proyecto si demuestra que es una plataforma flexible.

Esta misma adaptabilidad extiende en rango de aplicaciones de este tipo de tecnologías a infinidad de aplicaciones, no solo para la agricultura si no para muchas áreas del conocimiento humano. Solo por ejemplificar una, un sistema de alerta temprana para desastres naturales pudiera ser una muy buena opción para la aplicación de una red de sensores inalámbricos.

El desarrollo e investigación de los sistemas de sensores inalámbricos ira tomando cada vez más importancia en nuestras vidas cotidianas y nos iremos encontrando con su incursión de maneras que no imaginábamos y que modelaran la manera en que el ser humano interactúa con su medio.

VI. Bibliografía

A.W. Warrick. 2002. Soil Water Dynamics. Oxford University Press Inc., New York.

Blackmore, B.S. (1994). Precision farming; an introduction. Outlook on Agriculture

Daniel Hillel. 1971. Soil and water. Academic Press Inc. New York 1971.

Dr. Geoff V Merret, Dr. Yen Kheng Tan. 2010. Wireless sensor networks: Application-centric design. InTech, India.

Guillermo Castañón. 2000. Ingeniería del riego. Utilización del agua. Paraninfo, Madrid España.

Ignacio García Casillas, Gregorio Briones Sánchez. 2009. Sistemas de riego por aspersión y goteo. Trillas, México.

Ladha, J. K.; Fischer, A. K.; Hossain, M.; Hobbs, P. R. & Hardy, B. (2000). Improving the Productivity and Sustainability of Rice-Wheat Systems of the Indo-Gangetic

Manish Kumar and Ojha C. S. P. (2012), "Analysis of Mean Monthly Rainfall Runoff Data of Indian Catchments using Dimensionless variables by Neural Network" Journal of Environmental Protection, Scientific Research, USA

Manish Kumar. 2012. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. InTech, Croatia.

O'Connell, M.G. and Goodwin, I. (2008). Water stress and reduced fruit size in micro-irrigated pear trees under deficit partial rootzone drying. Australian Journal of Agricultural Research

Panchard, J. 2007. COMMONSense Net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. Information Technologies and International Development, Vol. 4, No. 1

Pierce, F.J. & Nowak, P. (1999) Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy

Waldo Ojeda Bustamante. 2000. Pronostico del riego en tiempo real, 2da ed. IMTA Morelos, México.