



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
DEL VALLE DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“Diseño de un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego
en cultivos”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

José Rafael Argumedo Pereda

Director de tesis:

Darío Cisneros Arreola

Co-Director:

Merit Cisneros González

Durango, Dgo. México, diciembre, 2022.





Diseño de un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego en cultivos

Presenta:

Ing. José Rafael Argumedo Pereda

COMITÉ TUTORIAL

M.C. Darío Cisneros Arreola Director	 Firma
Dra. Merit Cisneros González Codirector	 Firma
Dr. Manuel Ismael Mata Escobedo Asesor	 Firma
Dra. Ixchel Abby Ortiz Sánchez Asesor	 Firma

M.C. Norma Alicia García Vidaña

Coordinador del programa de la maestría en ingeniería.

M.C. Adriana Eréndira Murillo

Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

Durango, Dgo. México

diciembre de 2022





Autorización de impresión de tesis



EDUCACIÓN



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **24 / Noviembre / 2022**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 518 / 22.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. JOSÉ RAFAEL ARCUMEDO PEREDA

No. DE CONTROL GT1041088

PRESENTE.

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

"Diseño de un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego en cultivos"

CONTENIDO:

- RESUMEN
- ABSTRACT
- CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN
- CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO
- CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS
- CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- ANEXOS

ATENTAMENTE.

Excellencia en Educación Tecnológica
"Lo Técnico al Servicio de la Patria"

Adriana Eréndira Murillo

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM/amymc



Av. Felipe Terán 3000 Dgo. S.L. Santa Mónica C.P. 34000 Durango, Durango.
Tel. 4412 82070 e-mail: dte_iteDurango@tncm.mx basea.es | itedurango.edu.mx





Autorización de tema



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a 24 / Noviembre / 2022

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 519 / 22

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. JOSÉ RAFAEL ARGUMEDO PEREDA
No. DE CONTROL GT1041088
PRESENTE.

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

"Diseño de un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego en cultivos"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE,

Excelencia en Educación Tecnológica
"Lo Tercero al Servicio de la Patria"

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AE/fo/mmc



Av. Felipe Pescador #1000 Ote. Cua, Nueva Vindaya C.P. 34050 Durango, Durango.
Tel. (474) 272460 e-mail: de_i@tecnologico.mx | tecna.mx | iddurango.edu.mx





Agradecimientos

A mi familia que siempre me ha apoyado en todos los proyectos que he emprendido, a todos los profesores que me dieron formación a lo largo de mi vida académica, muy en especial a mi comité tutorial que siempre estuvieron apoyándome durante mi transcurso de la Maestría en Ingeniería, desde mi inscripción hasta el momento de mi titulación.

Agradezco a mi Alma Mater el Instituto Tecnológico de Durango (como formación de ingeniero) y a la sede Instituto Tecnológico Valle del Guadiana, que durante los dos años de la maestría me abrió sus puertas para la parte formativa y experimental para poder concluirla con satisfacción.

Siendo de mis más sinceros agradecimientos al Conacyt, que se me dio la oportunidad de obtener una beca durante toda mi trayectoria de formación de maestría, apoyo que fue de bastante ayuda, siempre apoyando a los jóvenes que continúan con su formación académica en posgrados.





Resumen

Debido a la escasez de agua en las presas que se ha presentado desde tiempos pasados en el Estado de Durango, se han establecido prácticas para evitar el uso irracional del recurso hídrico que se tiene en las tierras de cultivo. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego utilizando el maíz como cultivo indicador; el trabajo se realizó en parcelas agrícolas bajo condiciones de riego pertenecientes a dos productores de dos comunidades del municipio de Durango. Se adquirieron en el mercado tres dispositivos comerciales con el fin de tomarlos como referencia para el diseño del dispositivo. Con base a los análisis de laboratorio se determinaron cuatro tipos de suelos procediendo a establecer dos etapas para operar los dispositivos comerciales, ambas etapas se realizaron durante el ciclo agrícola Primavera – verano 2020. En base al comportamiento de los dispositivos comerciales durante la primera fase se determinaron las características que debería tener el dispositivo. La etapa de validación del dispositivo se realizó durante el ciclo primavera – verano 2021. Para determinar el tiempo óptimo de riego, se programó el dispositivo para que a través de colores mostrara el grado de humedad de los suelos y posteriormente realizar una comparación con los valores sugeridos por TRAXCO (2009) y estar en posibilidades de realizar los ajustes entre el tipo de textura del suelo, los valores de humedad y el tipo de color en el dispositivo, bajo esta metodología podrá determinarse el tiempo óptimo de riego. Respecto a la comparación realizada entre el dispositivo propuesto y dos dispositivos comerciales para la determinación de humedad, no se encontraron diferencias estadísticas ($P > 0.05$) en relación con los datos de humedad en los cuatro tipos de suelo, además se observó alta correlación entre los valores de humedad obtenidos entre el dispositivo desarrollado y los comerciales OEM®, y Nahita® ($r = 0.97$ y $r = 0.94$, respectivamente). De manera adicional se encontró que, por la calidad de los materiales y sensores, se puede denominar como un dispositivo de uso industrial; esto es debido a que las sondas son capaces de soportar la corrosión y oxidación de la humedad.





Abstract

Due to the scarcity of water in the dams that has been present since past times in the State of Durango, practices have been established to avoid the irrational use of the water resource in the croplands. The objective of this research was to develop a device to determine the optimum irrigation time using corn as an indicator crop; the work was carried out in agricultural plots under irrigation conditions belonging to two producers from two communities in the municipality of Durango. Three commercial devices were acquired in the market in order to take them as a reference for the design of the device. Based on the laboratory analysis, four types of soils were determined, and two stages were established to operate the commercial devices; both stages were carried out during the Spring-Summer 2020 agricultural cycle. Based on the behavior of the commercial devices during the first stage, the characteristics that the device should have were determined. The validation stage of the device was carried out during the spring-summer 2021 cycle. To determine the optimum irrigation time, the device was programmed to show the degree of soil moisture through colors and then make a comparison with the values suggested by TRAXCO (2009) and be able to make adjustments between the type of soil texture, moisture values and the type of color in the device, under this methodology the optimum irrigation time can be determined. Regarding the comparison made between the proposed device and two commercial devices for moisture determination, no statistical differences were found ($P>0.05$) in relation to the moisture data in the four types of soil, and a high correlation was observed between the moisture values obtained between the developed device and the commercial devices OEM® and Nahita® ($r=0.97$ and $r=0.94$, respectively). Additionally, it was found that, due to the quality of the materials and sensors, it can be called a device for industrial use; this is because the probes are capable of withstanding corrosion and oxidation of moisture.





Tabla de contenido

Autorización de impresión de tesis.....	III
Autorización de tema	IV
Cesión de Derechos.....	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Tabla de contenido	IX
Índice de figuras	XI
Índice de cuadros	XII
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Sensores remotos en la agricultura.....	2
1.1.2 Sistemas de posicionamiento geográfico	3
1.1.3 Importancia de las características físico – químicas de cultivos en la producción agrícola.....	5
1.2 Objetivos	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos	7
1.3 Justificación	8
1.4 Delimitación del problema	8
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Agricultura de Precisión.....	9
2.1.1 Protocolos de comunicación aplicados a cultivos	10
2.2 Variables de importancia en suelos agrícolas	10
2.2.1 Humedad	10
2.2.2 Temperatura	11
Capítulo 3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1 Localización	13
3.2 Actividades durante el ciclo primavera-verano 2020.....	13
3.2.1 Recorrido de campo	13





3.2.2 Muestreo de suelos 13

3.2.3 Trabajos previos 14

3.2.3.1 Primera Etapa 14

3.2.3.2 Primera Fase 14

3.2.3.3. Segunda Fase 16

3.3 Diseño del dispositivo 18

3.3.1 Material Electrónico 19

3.3.2. Adquisición de piezas 24

3.3.3. Estructura 26

3.4 Validación del dispositivo 28

3.4.1. Adecuación del área experimental 28

3.4.2. Establecimiento del cultivo 29

3.4.3. Determinación del tiempo óptimo de riego 29

3.5 Análisis estadístico 31

Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 32

4.1 Análisis de laboratorio 32

4.2. Determinación del tiempo óptimo de riego 33

4.3. Comparación entre dispositivos para determinación de humedad 35

Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 37

REFERENCIAS 38

ANEXOS 41





Índice de figuras

Figura 1. Interacción entre varios elementos que integran la AP.....	4
Figura 2. Relación general Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, Agua no Disponible.	11
Figura 3. Ubicación de las parcelas.....	13
Figura 4. Muestreo de suelos e identificado de las muestras.	14
Figura 5. Prueba de germinación.....	15
Figura 6. Aplicación de insecticida.	15
Figura 7. Puntos localizados con ayuda de GPS Garmin® en Praxedis Guerrero y Felipe Ángeles. 16	
Figura 8. Etiquetado y toma de lecturas en Praxedis Guerrero y Felipe Ángeles	16
Figura 9. Colocación de estacas señalizadoras de 1.20 y 2.40 m de alto.	17
Figura 10. Estado de las plantas en ambos sitios de trabajo.....	17
Figura 11. Espigamiento en ambos sitios de trabajo.	18
Figura 12. Dispositivos comerciales utilizados en validación de dispositivo. De izquierda a derecha: OEM®, Nahita®, Tel-Tru®, RSTECH® y Garmin®.	18
Figura 13. Microcontrolador de marca Arduino®.	19
Figura 14. Convertidor RS485 – Serial.....	20
Figura 15. Sonda para toma de lecturas de humedad y temperatura.	20
Figura 16. Modulo GPS con su antena cerámica.	21
Figura 17. Pantalla OLED para presentación de información.....	22
Figura 18. Modulo para tarjeta SD.....	22
Figura 19. LED RGB utilizado como testigo de alarma.	23
Figura 20. Material misceláneo para conexiones.	24
Figura 21. Plataforma IDE Arduino.....	25
Figura 22. Lógica del diseño del dispositivo.....	26
Figura 23. Módulo uno para componentes principales.	26
Figura 24. Módulo dos para batería recargable.....	27
Figura 25. Dispositivo físico colocado en el brazo.	27
Figura 26. Montaje de componentes dentro de módulo prototipado.	28
Figura 27. Montaje de batería portátil dentro de su módulo prototipado.....	28
Figura 28. Composición del suelo.....	30
Figura 29. Diseño en campo del experimento.....	31
Figura 30. Lecturas promedio de humedad tres diferentes dispositivos electrónicos.	36
Figura 31. Pantallas de visualización de datos del dispositivo desarrollado, OEM® y Nahita® respectivamente.....	36





Índice de cuadros

Cuadro 1. Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta	12
Cuadro 2. Análisis físico- químicos de las áreas de estudio	32
Cuadro 3. Cálculo de CC y PMP de los suelos aplicando las fórmulas propuestas por Peele (2016) y Briggs (2016).	33
Cuadro 4. Valores de humedad del suelo propuestos por TRAXCO (2009) de acuerdo a la textura de suelo y con modificación por Argumedo (2022).....	34
Cuadro 5. Valores propuestos obtenidos con el dispositivo para determinación del tiempo óptimo de riego.....	35





Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

En tiempos modernos uno de los mayores retos que atraviesa el mundo es la escasez de agua en la producción agrícola; la falta de humedad en el suelo afecta negativamente al cultivo y por lo tanto a su rendimiento, debido a ello se posiciona la agricultura como el mayor consumidor de agua en el mundo; el suministro inadecuado y la mala programación del riego en la producción de los cultivos hacen al recurso hídrico cada vez más escaso, por lo que una mejor estimación de las necesidades hídricas de los cultivos permitirá la gestión adecuada del riego y la conservación del agua para la agricultura.

A nivel nacional existe un elevado déficit en el manejo del agua de riego lo que mayormente se debe a una mala infraestructura hidráulica, principalmente en el área de conducción al predominar el riego de gravedad en un 74.9% y de este el 63.59% opera en canales de tierra (INEGI, 2019). Esta situación origina que una gran cantidad de productores no dispongan de la cantidad suficiente de agua para sus cultivos, además que en la mayoría de las veces el productor llega a aplicar el riego sin utilizar alguna herramienta o equipo que le permita estimar el momento óptimo de aplicación del riego sin afectar el estado del cultivo; ahí la falta del uso de estas tecnologías, agregando que el sistema de riego predominante ocasiona grandes desperdicios de agua que podría ser menor al mejorar el sistema de conducción del agua así como la implementación de tecnologías de apoyo que permitan determinar el tiempo óptimo del riego en los cultivos.

La agricultura es una actividad que cada vez demanda el mayor uso de la tecnología para incrementar la eficiencia en sus diferentes sistemas productivos. Esta tecnología, aunque existe en el mercado generalmente no se encuentra disponible para la mayoría del sector productivo debido a sus elevados costos.

Un factor determinante dentro de los procesos productivos agrícolas es el contenido de humedad de los suelos los que deben tener humedad suficiente para el buen desarrollo de las plantas. Este parámetro toma alta relevancia debido a que al ser el agua un elemento poco disponible en la mayoría de los sectores agrícolas se requiere del uso de dispositivos que permitan realizar un monitoreo continuo de la humedad en los suelos para aplicar de manera oportuna el riego para el cultivo.





1.1 Antecedentes

1.1.1 Sensores remotos en la agricultura

En los últimos años se ha estado hablando de un término que se ha implementado y utilizado ampliamente en agricultura, el cual es “agricultura de precisión (AP)”, en donde se desarrolla y aplica el uso de sensores para brindarle a los agricultores datos reales sobre sus cultivos, tomando en cuenta que el punto de inicio fueron los sensores de proximidad y por los resultados fiables que otorgan los sensores remotos.

Arnó et al. (2017), sugieren que el monitoreo por sensores remotos es la manera de obtener información sobre objetos, coberturas del suelo u otros fenómenos sin tener contacto físico con ellos. Esto se logra con ayuda de algunos sensores de proximidad como cámaras fotográficas. Además, señalan que el término monitoreo por sensores se refiere generalmente al uso de sensores que están localizados en satélites, aeronaves o vehículos aéreos no tripulados como VANT y drones. De las aplicaciones principales de los sensores remotos se considera el monitoreo específico de cultivos a través de los índices de vegetación; el más conocido es el de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, en inglés).

Las nuevas tecnologías, se pueden considerar en dos diferentes fases; la fase 1, se puede llamar “nativa”, es obviamente costosa en términos de desarrollo y aplicación. Pero cuando la tecnología demuestra que responde a una necesidad real del mercado, entra la fase 2, en la cual surge el ahorro de costos a través del uso extensivo de la tecnología y trae también beneficios para el usuario (Breton, 2017).

Autores como Reyes et al. (2019) citan que el término “evapotranspiración (ET)” se describe como la evaporación de agua de la superficie del suelo o la interceptada por los cultivos y que la transpiración de las plantas se ve afectada por diversos factores atmosféricos tales como: temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Al estimar los cambios de ET, los técnicos pueden planear y administrar racionalmente el uso de los recursos hídricos en áreas de agricultura, especialmente en regiones áridas y semiáridas en donde el agua es factor limitante para la producción agrícola. A diferencia de las imágenes aéreas y satelitales, Gutiérrez et al. (2011), hacen referencia a un sistema llamado GreenSeeker cuya función es brindar un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este sistema provee información obtenida localmente y de manera rápida mediante determinaciones terrestres; algunas de esas son el estado fisiológico, la incidencia de estrés y rendimiento potencial de los cultivos.





La obtención de información de plantas y cultivos sin tener contacto directo hace que su aplicación sea tentativa, ya que es un método no dañino y de bajo costo. La efectividad de la teledetección va de la mano con la capacidad fisiológica de las plantas, que mantienen contacto con la radiación solar y generan respuestas espectrales de reflectividad asociadas con estados fenotípicos observados en campo (Ortiz & Torres, 2018).

Autores como Enríquez et al. (2014), describen el Sistema de Control Agrícola (SISCA), el cual es un instrumento de software que tiene como función principal habilitar, ayudar y situar a los productores y agricultores sobre los tipos de cultivos aptos para sembrar acorde al pH de sus tierras, además de enseñar y otorgar recomendaciones sobre los productos viables a utilizar en caso de mostrarse alguna plaga que alcanzaran en afectar a los cultivos.

Urbano (2013), diseñó una red de sensores inalámbricos para la Agricultura de Precisión en cultivos de café en Colombia usando el estándar IEEE-802.15.4. La arquitectura del sistema consiste de tres nodos que manejan sensores para temperatura y humedad del suelo, temperatura de las hojas, radiación solar y flujo fotosintético empleando un radio XBee IEEE-802.15.4. El nodo coordinador tiene una estación climatológica y un módem GSM cuya función es enviar los datos a un servidor central. Asimismo, Anurag et al. (2008) desarrollaron un sensor inalámbrico tipo red para la agricultura de precisión donde la información se presenta en tiempo real de las condiciones climatológicas y ambientales. La arquitectura está conformada de tres partes distintas: (a) el nodo de sensores (b) la red de malla inalámbrica y (c) los actuadores centrados bajo estándar IEEE-802.15.4. Los sensores se eligen según las propiedades adecuadas para los cultivos más comunes y se contemplaron cuatro atributos: humedad, temperatura, pH y conductividad eléctrica.

1.1.2 Sistemas de posicionamiento geográfico

Uno de los pilares importantes en los avances tecnológicos han sido la implementación de posicionamiento geográfico para llevar un control y mantenimiento de los equipos como maquinaria, vehículos e incluso equipos de comunicación, para lo cual resulta muy útil utilizar el sistema GPS (por sus siglas en inglés “Sistema de Posicionamiento Global”) y con ello han aparecido en el mercado un gran número de aplicaciones disponibles que contienen este sistema.

Camba & Villamarín (2015), desarrollaron una aplicación llamada “Machine App” bajo la metodología Scrum, en donde el propietario puede asignar equipos o maquinarias a un usuario determinado. Esto tiene la finalidad de poder vigilar a través de un dispositivo móvil inteligente con



sistema operativo Android, toda la información relacionada al equipo o maquinaria como estado de equipo, ubicación, horas de trabajo, consumo y nivel de combustible y el estado de funcionamiento.

Para Campos et al. (2015), los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) son las tecnologías primordiales de la AP donde la información de la posición es un requisito para la aplicación de tecnologías para el manejo del cultivo de sitio específico, tales como: el monitoreo de rendimiento, muestreos de suelo o aplicación variable de insumos, las cuales se llevan a cabo con suficiente precisión con los sistemas diferenciales (DGPS) y sistemas de corrección de posición tiempo real (RTK-GPS).

Bongiovanni (2001) señala que el uso de sistema GPS favorece que los agricultores puedan recabar datos sobre sus terrenos de cultivo, pudiendo ser durante la cosecha o antes a ella, de tal forma que en la actualidad los cultivos ya no han de ser necesariamente tratados como una extensión de terreno con características uniformes, tal como se muestra en la Figura 1.

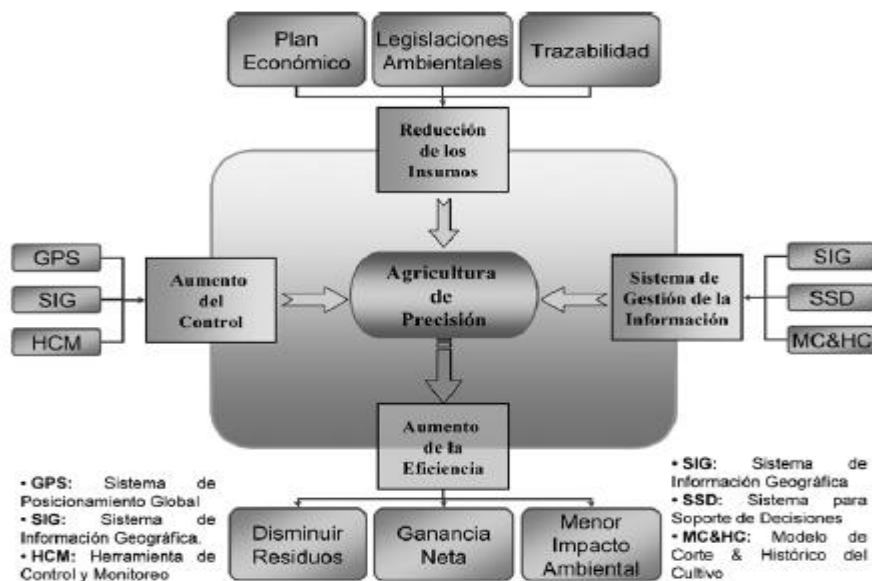


Figura 1. Interacción entre varios elementos que integran la AP.
Fuente: Bongiovanni (2001)

Los Mapas de Rendimiento (MR) son imágenes que contienen georreferencias con una escala de colores que indican la productividad de un determinado sitio en particular; los MR son accesos para





el proceso de aplicación de Dosis Variable (DV) los cuales pueden ser diferentes químicos que requiere un cultivo: fertilizantes, herbicidas y riegos, entre otros. Para Lago et al. (2011), a las cosechadoras, fertilizadoras, y otras maquinarias agrícolas, les hace falta la instalación de un computador a bordo para el control y monitoreo, también es permitido el uso de sensores de flujos para medir y registrar el rendimiento puntual.

La exactitud de los GPS autónomos de guía está sujeta a bastantes variables como es la precisión y esta va a depender extensamente de la utilización de una o dos frecuencias y del uso de correcciones diferenciales. Otra variable que contribuye en la precisión es la frecuencia con la que el receptor GPS da la información de posicionamiento el cual debe estar en el rango de 1 a 20 HZ. Con estas variables, es posible minimizar errores de algunos metros a unos centímetros con correcciones diferenciales (García et al. 2011).

1.1.3 Importancia de las características físico – químicas de cultivos en la producción agrícola

Para poder conocer el problema que se enfrenta en la producción agrícola, se tienen que conocer las características y condiciones presentes en el ámbito agronómico, por ello es importante conocer las características físicas y químicas que requieren los cultivos durante su desarrollo y analizar cómo obtener el mejor rendimiento.

Vitoria & Méndez (2007) estudiaron la relación entre la conductividad eléctrica y el pH del agua de remojo, la germinación y crecimiento de plántulas en invernadero utilizando semillas de maíz sin tratar y semillas sometidas a la cámara de envejecimiento acelerado (72 h a $45 \pm 1^\circ\text{C}$ y 100% de humedad relativa). Concluyen que la prueba de conductividad eléctrica podría ser una guía del comportamiento de semillas de maíz en condiciones extremas o desfavorables además que, con elevados valores de altura de la planta, peso seco del vástago y de la radícula en invernadero, tanto en semillas sin envejecer como envejecidas, presentaron bajos valores de conductividad eléctrica.

En todo sistema suelo-planta existe un conjunto de componentes físicos como el contenido de agua, proporción de oxígeno, temperatura del suelo y resistencia mecánica que tienen un episodio directo sobre la conducta del cultivo. Por ello Herreras et al. (1999) demostraron que la temperatura del suelo es un elemento importante en el ciclo de los cultivos para la germinación ya que determina la duración de la etapa siembra - emergencia, asimismo para la etapa de post emergencia.





En estudios realizados por Gavilán et al. (2019), señalan que la evapotranspiración (ET) es cuando el agua presente en el suelo se traslada a la atmósfera en forma de vapor por lo que es considerada como uno de los flujos más significativos en el ciclo hidrológico, con valores de más del 60% de las precipitaciones que retornan a la atmósfera a través de ET. Los datos aportados por satélites son una herramienta interesante para conseguir datos sobre la vegetación y la humedad del suelo que se puede conjuntar con información meteorológica.

De las principales causas del desgaste físico, químico y biológico de los suelos realizada por la actividad humana, comprende la degradación y modificación en la calidad del suelo, ya que presume una baja en la productividad como cambios en las funciones ecológicas del mismo (Trasar et al. 2008).

Para Hossne et al. (2016) el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) es sembrado en los suelos que son compactados por equipo y afianzado por secado y humedecimiento y escasamente regados; el desarrollo de la raíz del maíz es afectada positivamente por el contenido de agua más que por la compactación y la penetración de las raíces muestra diferencia significativa con relación a la irrigación.





1.2 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego en cultivos utilizando parcelas agrícolas de productores de la Asociación de Usuarios de Riego “Santiago Bayacora, Dgo”, considerando el cultivo del maíz como caso de estudio.

Objetivos específicos

- Desarrollar un dispositivo de fácil operación tanto para el técnico como para el productor.
- Validar el dispositivo con los de uso comercial
- Clasificar los suelos de las parcelas en estudio





1.3 Justificación

Debido a que el agua es un recurso limitado en Durango, es indispensable la selección de los mejores componentes tecnológicos que favorezcan la optimización del uso de los recursos hídricos y ayudar con ello, a la sostenibilidad de la producción agrícola. Si se efectúa una aplicación ineficiente del riego provocará desperdicio constante de agua, y ello derivara principalmente por el uso de la opinión del agricultor como único criterio para la toma de decisiones; el agricultor genera el manejo de cada parcela con base en su propia experiencia, aunque ya existen en la actualidad programas efectivos para la programación y aplicación eficiente del riego (Rosales, 2017).

En el presente trabajo se realizó el diseño y elaboración de un dispositivo el cual se considera una herramienta de apoyo hacia los productores agrícolas y usuarios de Presa Santiago Bayacora del municipio de Durango, Dgo con el fin de incrementar la eficiencia en el uso del agua de riego.

Con la implementación del dispositivo se podrán adquirir datos más precisos que son tomados por cada productor y con ello verificar si se requiere el agua, y en consecuencia tener una mayor producción.

1.4 Delimitación del problema

El dispositivo desarrollado proporciona información sobre el tiempo óptimo de riego para suelos agrícolas en donde se cultive maíz, esta información se obtiene a través de una alarma visual agregada (LED multicolor). Como área de mejora, se trabajaría en recabar información de los principales cultivos del estado de Durango, para ello se tomará la experiencia de los productores sobre los ciclos de siembra y determinar las condiciones más precisas del tiempo óptimo de riego para sus cultivos. Esto ayudará en un futuro a generar una base de datos que al ejecutarse dé un ajuste automático al dispositivo para que proporcione valores de alarma, obteniendo un dispositivo útil en el cultivo de interés.





Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Agricultura de Precisión

Autores como García & Flego (2008) señalan que la agricultura de precisión (AP) corresponde a una estrategia de administración que utiliza tecnología de la información y comunicaciones para recolectar datos útiles desde distintas fuentes con el fin de apoyar las decisiones asociadas a producción de cultivos.

La AP alberga el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de otros medios electrónicos para recabar datos de cultivo; las tecnologías de la AP permiten poder encontrar los requerimientos de la agricultura moderna, así como el manejo óptimo de grandes extensiones de tierra. Lo que se pudiera considerar como principal ventaja es que a través del estudio de los resultados se pueden ejecutar divisiones diferentes dentro de un mismo lote y poder convenir el manejo diferencial dentro de los mismos. Además, se puede examinar el tipo y cantidad de fertilizante para aplicar, la densidad de la semilla, la fecha de siembra, el espaciamiento entre las hileras o surcos, entre algunas más actividades agrícolas. Con la utilización de la AP se puede ayudar a optimizar los márgenes a través de una ampliación del valor de rendimiento (cantidad y calidad), de una reducción de cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente.

Los beneficios que puede ofrecer la AP son:

- Disminución de costos y reducción de uso de insumos
- Grandes rendimientos con los mismos insumos
- Superior calidad de las cosechas por la acción de una mejor combinación de los requerimientos e insumos aplicados

García & Flego (2008) señalan que las herramientas de la AP se dividen en:

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS)
- Monitoreo de rendimiento y mapeo
- Muestreo intensivo de suelos
- Percepción remota
- Dispositivos electrónicos
- Redes de Comunicación
- Sistema de Información Geográfica (GIS)





- Dosis variable de fertilizantes y densidad de siembra variable
- Banderillero satelital
- Software
- Beneficios y barreras de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's) en la AP

2.1.1 Protocolos de comunicación aplicados a cultivos

Modbus/TCP es un protocolo de comunicación diseñado para permitir a equipos industriales tales como Controladores Lógicos Programables (PLCs), computadores, drivers para motores y otros tipos de dispositivos físicos de entrada/salida comunicarse sobre una red.

Modbus/TCP fue introducido por Schneider Automation como una variante de la familia de protocolos MODBUS, ampliamente usada para la supervisión y el control de equipo de automatización (Ruiz Olaya et al. 2011).

El estándar de comunicación industrial RS485 es el primer método soportado por el controlador, este es una comunicación cableada que puede transmitir datos a altas velocidades y a largas distancias (10 Mbit/s hasta 12 metros y 100 kbit/s en 1200 metros) y permite la comunicación de múltiples sensores a través de un mismo cable par trenzado (Valencia & Sepúlveda, 2019).

2.2 Variables de importancia en suelos agrícolas

2.2.1 Humedad

Para Caisedo et al. (2021) la humedad juega un papel determinante en la fertilidad del suelo afectando el desarrollo de los cultivos, además su disponibilidad da sustento a los procesos biológicos. Además, que también ayuda en el ajuste de la temperatura del suelo, por ello en la actualidad se desea monitorear la cantidad de agua disponible, para mejorar su uso e inspeccionar las propiedades del suelo. Autores como Zotarelli et al. (2013), señalan que cada suelo contiene diferente cantidad de agua y eso dependerá de su textura y estructura. También hacen énfasis en que el suelo se encuentra compuesto por el límite superior encargado de la captura del agua, lo cual ocurre cuando en un evento de lluvia o de riego satura el suelo y existe un rápido movimiento descendente ejercido por la fuerza de gravedad. Después de un tiempo (en promedio es de 24 horas), el drenaje se vuelve insignificante y en ese punto, la humedad del suelo se le denomina “capacidad de campo”. Por otro lado, el límite inferior es conocido como “punto de marchitez permanente



(PMP)”, que está definido como la cantidad de humedad del suelo en que la planta ya no tiene la capacidad de absorber agua del suelo, propiciando que la planta se marchite y muera, si es que no existiera agua adicional que se proporcione.

A la cantidad total de agua disponible para la absorción de la planta se le nombra “agua disponible para la planta (ADP)”, la cual se considera como la diferencia entre CC y PMP y a menudo se expresa como un porcentaje del volumen (volumen de agua/ volumen de muestra de suelo). La “capacidad de retención de agua disponible (CRAD)” se determina multiplicando el ADP por la profundidad de la zona de las raíces donde se produce la extracción de agua. En la Figura 2 se observa de manera gráfica la relación entre CC, PMP y ADP.

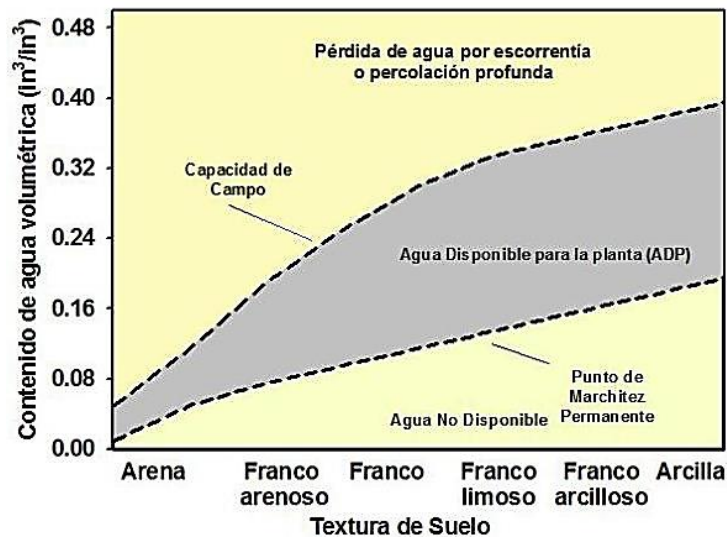


Figura 2. Relación general Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, Agua no Disponible.

Fuente: Zotarelli et al. (2013)

2.2.2 Temperatura

Fisher et al. (1997) señalan que la temperatura tiene un papel importante sobre los órganos de la planta ya que se representa como un factor iniciador y regulador de los procesos de metabolismo, crecimiento y desarrollo. En ocasiones algunos órganos o incluso hasta la propia planta, pueden morir cuando la temperatura supera los límites de un rango determinado. En consecuencia, son variados y complejos los procesos de crecimiento de la planta, por ello que las temperaturas óptimas pueden variar entre cada proceso y tejido (por ejemplo, la temperatura para crecimiento radical es más baja que para el de tallo y brotes).





Todas las plantas tienen estrés hídrico bajo las variaciones de temperatura que ocurre durante ciclos estacionales y diurnos así que, cada órgano se puede encontrar a diferente temperatura en algún momento dado. El crecimiento rápido por división celular demanda de mucho calor, su temperatura ideal está situada para la mayoría de las plantas herbáceas cerca de los 30°C; además del calor radiado por el sol en la superficie del suelo se produce una pequeña cantidad de calor ocasionada por las transformaciones co-biológicas de la materia orgánica como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta

Temperaturas óptimas del Maíz (<i>Zea mays</i>)		
Rangos	Mínima (°C)	Máxima (°C)
Germinación	8 - 10	40 - 44
Crecimiento de raíz	17	37
Rendimiento máximo	25	30

Fuente: Fisher et al. (1997)





Capítulo 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización

Las áreas de estudio utilizadas fueron los suelos agrícolas de las comunidades de Felipe Ángeles y Praxedis Guerrero perteneciente a la Asociación de Usuarios de Riego de la presa Santiago Bayacora del Municipio de Durango (Figura 3), el clima es de tipo seco con temperatura media anual de 17°C, la precipitación media anual es de 500 mm (INEGI, 2021).



Figura 3. Ubicación de las parcelas.

3.2 Actividades durante el ciclo primavera-verano 2020

3.2.1 Recorrido de campo

Mediante recorridos de campo por las parcelas de los productores se realizó una inspección ocular con el fin de determinar una posible variación de los suelos agrícolas, principalmente debido a su coloración. De acuerdo con el diagnóstico se establecieron las áreas para realizar un muestreo de suelos a una profundidad de 30 cm.

3.2.2 Muestreo de suelos

Posterior al diagnóstico ocular en las dos parcelas se ubicaron cuatro tipos de suelo, realizando un muestreo utilizando la técnica del zig – zag (INIFAP, 2012). Las muestras se depositaron en bolsas de plástico e identificadas, posteriormente se mezclaron con el fin de obtener una muestra representativa en cantidad aproximada de 1 kg de cada tipo de suelo (Figura 4) y proceder a determinar las propiedades físicas y químicas; las cuales fueron analizadas en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana.





Figura 4. Muestreo de suelos e identificación de las muestras.

3.2.3 Trabajos previos

3.2.3.1 Primera Etapa

Se adquirieron en el mercado 5 dispositivos comerciales (dos digitales y 3 analógicos), los cuales se tomaron como referencia en su estructura para el diseño del dispositivo. Los dispositivos adquiridos se sometieron a diferentes pruebas tanto de operación como de calidad de la información, para ello se plantearon dos fases que se desarrollaron durante el ciclo primavera-verano 2020.

3.2.3.2 Primera Fase

De las parcelas en estudio se recolectó suelo suficiente para preparar una cama de siembra para el llenado de 12 rejas de plástico con medidas de 50 x 30 x 30 cm con la finalidad de establecer el cultivo de maíz, de cada tipo de suelo se llenaron 3 rejas hasta tener una cama de siembra de 35 cm. Para cada reja se evaluó la temperatura y humedad durante el ciclo de producción de maíz utilizando los dispositivos comerciales adquiridos. Las tomas de datos se realizaron una vez por semana, así como el análisis del comportamiento de cada dispositivo.

Previo al llenado cada una de las rejas plásticas, se realizó una prueba de germinación en las semillas, utilizando un plato de plástico para almacenar y quedar cubiertas con papel de cocina y dos láminas de algodón (Figura 5).





Figura 5. Prueba de germinación.

La siembra se realizó a una profundidad de 5 cm y a una distancia entre plantas de 8 cm, los fertilizantes utilizados fueron Sulfato de Amonio (20.5% N) y Fosfato Diamónico (18 – 46 – 00) de acuerdo con las recomendaciones de INIFAP (2015) para el cultivo del maíz. Con la finalidad de reproducir el desarrollo del cultivo bajo condiciones reales, se utilizó el agua de riego que emplean los usuarios y que proviene de la presa Santiago Bayacora.

Durante el ciclo del cultivo este se mantuvo libre de malezas mediante un control manual. La plaga de mayor importancia que se presentó fue el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) el cual se controló con Lorsban MR, aplicándolo directamente en el "cogollo" de la planta con el fin de hacer más eficiente su control (Figura 6).



Figura 6. Aplicación de insecticida.



3.2.3.3. Segunda Fase

La siguiente fase se realizó en las parcelas de maíz de los productores durante el mismo ciclo agrícola (primavera – verano, 2020). Esta fase inició inmediatamente después de haber realizado la primera escarda al cultivo (24 días después de la siembra).

Mediante el uso de los dispositivos comerciales se midieron las variables de humedad y temperatura, variables importantes que se utilizarían para el desarrollo del dispositivo. De manera adicional se utilizó un GPS de la marca “Garmin®” para georreferenciar las áreas de muestreo (Figura 7). En cada área, se tomaron 5 puntos, seleccionando una planta la cual se etiquetó para realizar su monitoreo de las condiciones de humedad y temperatura durante el ciclo de cultivo (Figura 8).



Figura 7. Puntos localizados con ayuda de GPS Garmin® en Praxedis Guerrero y Felipe Ángeles.



Figura 8. Etiquetado y toma de lecturas en Praxedis Guerrero y Felipe Ángeles



Debido al crecimiento del cultivo, se presentaron dificultades para localizar la etiqueta de las plantas en las parcelas, por lo cual se colocaron estacas señalizadoras inicialmente de 1.20 m de alto y posteriormente de 2.40 m además de una cinta de precaución en la punta para facilitar la ubicación de las plantas (Figura 9).



Figura 9. Colocación de estacas señalizadoras de 1.20 y 2.40 m de alto.

El año 2020 fue un año atípico en cuanto a precipitaciones pluviales superando el promedio anual que para esta región es de 500 mm llegando hasta los 700 mm por lo que se observaron varias plantas con hojas "secas" en algunas áreas de las parcelas. Los usuarios de las parcelas comentaron que posiblemente la presencia de dichas áreas secas haya sido generada por las humedades extremas y calores intensos que se presentaron en las tierras (Figura 10).



Figura 10. Estado de las plantas en ambos sitios de trabajo.



Después de los 70 días se comenzó a notar un considerable porcentaje de espigas en las plantas, además de que dio inicio el llenado del fruto (Figura 11).



Figura 11. Espigamiento en ambos sitios de trabajo.

3.3 Diseño del dispositivo

Como resultado de las pruebas de campo realizadas a los dispositivos comerciales, se procedió al diseño del dispositivo, estos dispositivos fueron para la determinación de humedad OEM ® y Nahita ®, mientras que para temperatura Tel-Tru ® y RSTECH ®, adicionalmente se utilizó un GPS marca Garmin ® con el fin de georreferenciar los puntos de muestreo (Figura 12).



Figura 12. Dispositivos comerciales utilizados en validación de dispositivo. De izquierda a derecha: OEM ®, Nahita ®, Tel-Tru ®, RSTECH ® y Garmin ®.



3.3.1 Material Electrónico

De acuerdo con la información obtenida sobre el comportamiento de los dispositivos comerciales durante la primera fase en las parcelas de los productores, esta fue analizada y se plantearon las características que debería tener el dispositivo. Se realizó un listado sobre del material electrónico necesario, así como de proveedores, precios, marcas y tiempo de entrega. El material adquirido fue un microcontrolador de marca Arduino® (Figura 13), un convertidor de comunicación tipo RS485 – Serial (Figura 14), el cual es el encargado de tener comunicación entendible al microcontrolador desde la sonda para medición de humedad y temperatura de suelos (Figura 15), módulo GPS con antena cerámica (Figura 16), pantalla de tipo “OLED” para mostrar toda la información recabada (Figura 17), módulo para tarjetas SD (Figura 18), la cual guarda información en archivo de tipo “.txt”, un LED tipo “RGB” para mostrar tonalidades de color dependiendo la cantidad de humedad en suelo (Figura 19) y material misceláneo (cables tipo “jumper”, soldadura estañada y placa para soldar entre otros) mostrados en Figura 20.

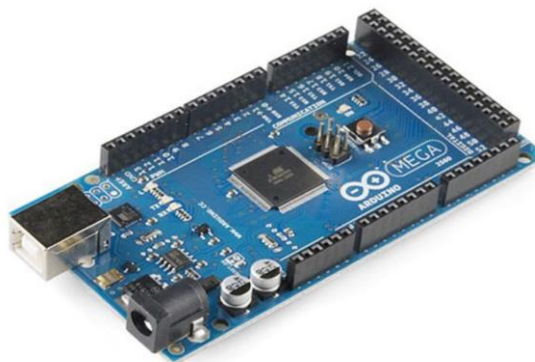


Figura 13. Microcontrolador de marca Arduino®.

- ✓ **Microcontrolador:** ATmega2560
- ✓ **Voltaje Operativo:** 5V
- ✓ **Voltaje de Entrada:** 7-12V
- ✓ **Voltaje de Entrada(límites):** 6-20V
- ✓ **Pines digitales de Entrada/Salida:** 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
- ✓ **Pines análogos de entrada:** 16
- ✓ **Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida:** 40 mA
- ✓ **Corriente DC entregada en el Pin 3.3V:** 50 mA
- ✓ **Memoria Flash:** 256 KB (8KB usados por el bootloader)
- ✓ **SRAM:** 8KB
- ✓ **EEPROM:** 4KB
- ✓ **Clock Speed:** 16 MHz



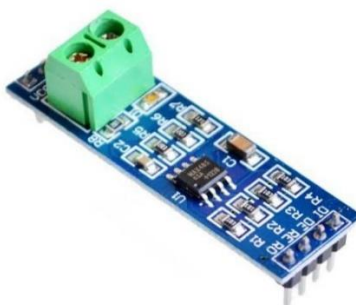


Figura 14. Convertidor RS485 – Serial.

- ✓ **Modelo:** MAX-485
- ✓ **Voltaje de operación:** 5V
- ✓ **Corriente de operación:** 120uA~500uA
- ✓ **Potencia de operación:** 830mW



Figura 15. Sonda para toma de lecturas de humedad y temperatura.

- ✓ **Modelo:** S-Temp&VWC
- ✓ **Interfaz:** RS-485
- ✓ **Protocolo:** MODBUS-RTU RS485
- ✓ **Voltaje de operación:** 3.6 ~ 30V DC
- ✓ **Corriente de operación:** 6mA@24V DC
- ✓ **Temperatura de trabajo:** -40°C ~ +85°C
- ✓ **Material de sonda:** Electrodo especial anticorrosivo
- ✓ **Material del encapsulado:** Resina epóxica con grado de protección IP68
- ✓ **Largo de cable:** 2 metros
- ✓ **Método de instalación:** Insertar la sonda hasta la mitad del encapsulado para que se tomen las mediciones.





Figura 16. Modulo GPS con su antena cerámica.

- ✓ **Voltaje de alimentación:** 3-5 VDC
- ✓ **Interfaz:** Serial UART 5V
- ✓ **Baud rate por defecto:** 9600bps
- ✓ **Antena cerámica**
- ✓ **EEPROM para guardar datos de configuración**
- ✓ **Batería de respaldo (MS621FE)**
- ✓ **Frecuencia de refresco:** 5Hz
- ✓ **Soporta SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN)**
- ✓ **Indicador de señal con LED**
- ✓ **Dimensiones antena:** 25mm x 25mm
- ✓ **Dimensiones Módulo:** 25mm x 35mm
- ✓ **Agujeros de montaje:** 3mm





Figura 17. Pantalla OLED para presentación de información.

- ✓ **Dimensiones de la pantalla:** 0.96 “ (2.7 x 2.7 cm)
- ✓ **Resolución de pantalla:** 128x64
- ✓ **Consumo de energía:** 0.06W
- ✓ **Angulo de visión:** Ultra ancho de 160°.
- ✓ **Fuente de alimentación:** DC 3-5V



Figura 18. Modulo para tarjeta SD.

- ✓ **Fuente de alimentación:** 4.5 – 5.5 VCD
- ✓ **Interfaz:** SPI Estándar
- ✓ **Material:** PCB
- ✓ **Dimensiones:** 42 x 24 x 1.5 mm
- ✓ **Peso:** 8g



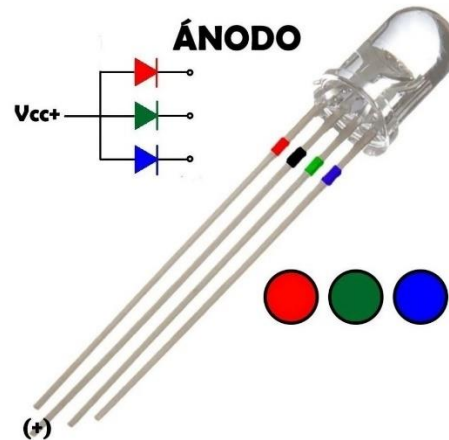


Figura 19. LED RGB utilizado como testigo de alarma.

- ✓ **Voltaje color rojo:** 1.9-2.1 V
- ✓ **Voltaje color verde:** 3.1-3.3V
- ✓ **Voltaje color azul:** 3.0-3.2 V
- ✓ **Intensidad luminosa color rojo:** 3000-4000MCD
- ✓ **Intensidad luminosa color verde:** 1800-2000MCD
- ✓ **Intensidad luminosa color azul:** 5000-6000MCD
- ✓ **Longitud de onda color rojo:** 625-630 NM
- ✓ **Longitud de onda color verde:** 520-525 NM
- ✓ **Longitud de onda color azul:** 460-470 NM
- ✓ **Angulo de visión:** 20-25 °





Figura 20. Material misceláneo para conexiones.

3.3.2. Adquisición de piezas

Las piezas electrónicas se adquirieron en plataformas digitales en mercado internacional como fue el caso de la sonda para tomar mediciones de humedad y temperatura, mientras que en mercado nacional se adquirieron los componentes de: GPS, pantalla OLED, módulo para tarjeta SD, convertidor de comunicación y el microcontrolador. Mientras que en el mercado local se adquirió el material misceláneo y LED de colores. Para la impresión en material plástico se utilizó una impresora 3D.





Adicionalmente en el desarrollo del dispositivo, se integró un programa bajo plataforma IDE Arduino® mostrados en Figura 21, que mantiene comunicación entre la sonda que toma las lecturas en el suelo y el módulo GPS, pudiendo mostrar cada variable obtenida en tiempo real y validar las condiciones del suelo.

```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Mega_ssHT_hs_GPS_IL_RGB $
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);
  serialhtc.begin(4800);
  Serial.println("Sonda HTC comunicacion serialhtcbus");
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  delay(500);
  pinMode(RE, OUTPUT);
  pinMode(DE, OUTPUT);
  pinMode(redLed, OUTPUT);
  pinMode(greenLed, OUTPUT);
  pinMode(blueLed, OUTPUT);

  // Declaraciones iniciales para la pantalla OLED
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(1);
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setCursor(10,10);
  display.print("Prototipo Humedad");
  display.setCursor(20,20);
  display.print("ArdMega HT - GPS");
  display.display();
  delay(3000);
}
```

Figura 21. Plataforma IDE Arduino.



El diseño del dispositivo fue tomado bajo la siguiente lógica a bloques (Figura 22).

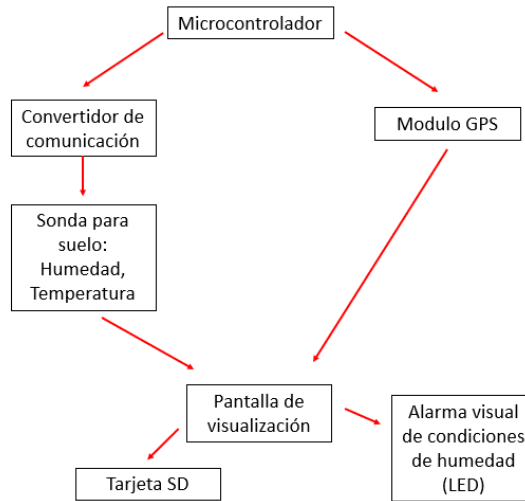


Figura 22. Lógica del diseño del dispositivo.

3.3.3. Estructura

La estructura del dispositivo consta de dos módulos, en el primero se encuentran alojados sus componentes electrónicos, microcontrolador, pantalla de visualización, alarma visual y sonda de trabajo (Figura 23). Mientras que el segundo módulo está únicamente destinado a ser la batería del dispositivo, la cual es recargable y tiene un almacenamiento de 10,000 mA, suficientemente potente para dar una autonomía de más de 9 horas de trabajo ininterrumpido (Figura 24), ambos módulos hechos bajo impresora 3D.

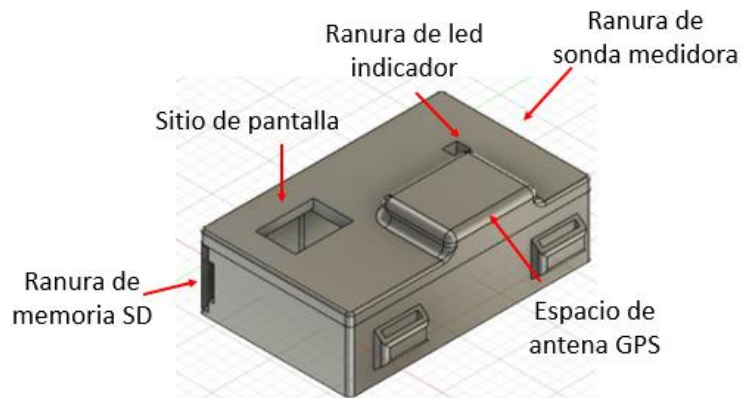


Figura 23. Módulo uno para componentes principales.





Figura 24. Módulo dos para batería recargable.

Con el fin de facilitar su operación en las parcelas agrícolas se le adicionó un mecanismo de sujeción para el antebrazo del operador, el cual fue diseñado con ayuda de impresora 3D colocando a los costados de cada módulo una especie de ojal. Mientras que como medio de sujeción se utilizaron correas autoadheribles de 1.5 cm de ancho, con el fin de dar firmeza y permita una adecuada operación sin lastimar el brazo del usuario (Figura 25).



Figura 25. Dispositivo físico colocado en el brazo.

El dispositivo ya en sus respectivos módulos, con sus cables de conexión y demás módulos antes mencionados quedó de la siguiente forma (Figura 26) y en el área de la batería tal se muestra en la Figura 27:



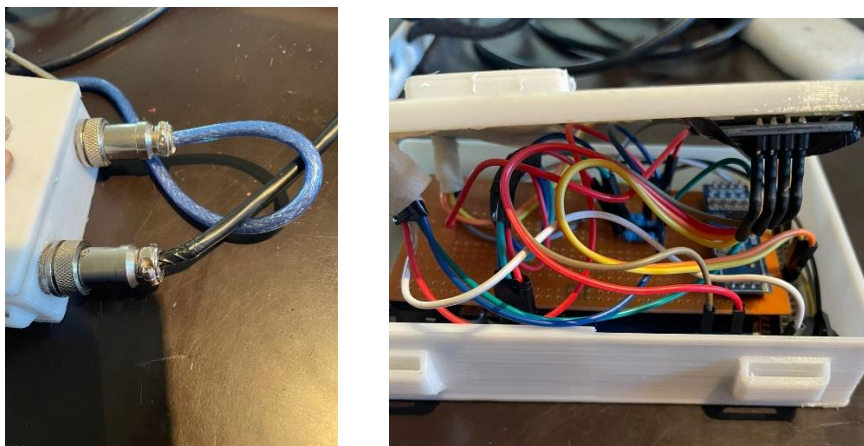


Figura 26. Montaje de componentes dentro de módulo prototipado.



Figura 27. Montaje de batería portátil dentro de su módulo prototipado.

3.4 Validación del dispositivo

3.4.1. Adecuación del área experimental

Esta fase se realizó durante el ciclo agrícola primavera – verano del año 2021; para ello se utilizó un solar particular con una dimensión de 30 m², se le aplicó una limpieza al lugar y nivelación del suelo, ya que se tenían relieves irregulares en el área de trabajo.

Con el fin de facilitar el drenado de las macetas y tener la misma altura en todas las macetas, se les colocó en la base una reja de material plástico de 35 cm de altura, además se acondicionó un sistema de malla sombra de 3.5 m de alto desde la base de las macetas, con altura suficiente para cubrir totalmente a el área y así evitar daños en plantas por posibles granizos.





3.4.2. Establecimiento del cultivo

Para el establecimiento del cultivo se realizó la misma metodología que en la primera fase (siembra y fertilización, riegos, variedad y labores culturales), solo que esta fase se realizó en macetas y no en rejas de plástico.

Después de la germinación de las semillas, se eligió la planta con las mejores características físicas la cual se tomó como referencia para la toma de lecturas de las variables durante el ciclo de producción, utilizando para las lecturas los dispositivos comerciales y el dispositivo desarrollado. Después de cada riego, y posterior al punto de saturación del suelo, se realizó la toma de lecturas existiendo una variación en los tiempos debido a las diferencias en la textura de los suelos de las parcelas. Las sondas fueron introducidas a 8 cm de profundidad con el fin de obtener información sobre las variables temperatura y humedad, considerando a esta última como variable principal debido a que en base a ella se determinaría el tiempo óptimo de riego. La toma de datos inició desde el crecimiento de las plantas lo cual fue desde principios de mes de junio hasta la maduración de la mazorca que sucedió a finales del mes de septiembre con un ciclo aproximado de 120 días.

3.4.3. Determinación del tiempo óptimo de riego

Para determinar el tiempo óptimo de riego se utilizó en primer término el análisis de laboratorio de los suelos en lo referente a las propiedades físicas, y posteriormente se realizó el cálculo de la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente para cada uno de los tipos de suelos utilizando las fórmulas de Peele y Briggs (2016):

Ecuación 1 Cálculo de Capacidad de Campo

Formula de Peele

$$CC = 0.48 * Ac + 0.162 * L + 0.023 * Ar + 2.62 \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

CC: Capacidad de campo.

Ac: Porcentaje de arcilla obtenido.

L: Porcentaje de limo obtenido.

Ar: Porcentaje de arena obtenido.





Ecuación 2 Cálculo de Punto de Marchitamiento Permanente

Fórmula de Briggs

$$PMP = 0.302 * Ac + 0.102 * L + 0.0147 * Ar \quad Ec (2)$$

Donde:

PMP: Punto de marchitamiento permanente.

Ac: Porcentaje de arcilla obtenido.

L: Porcentaje de limo obtenido.

Ar Porcentaje de arena obtenido.

Para obtener los valores de humedad para CC y PMP, se realizó una conversión entre los valores mostrados por el dispositivo para cada tipo de textura de los suelos y los valores reportados por Ortega (2014) sobre la composición para un suelo normal (Figura 28). Posteriormente se toma como criterio que los datos de humedad mostrados por el dispositivo representan solo el 50% de los componentes del suelo, ya que la humedad involucrada solo representa el 25% , la cual se filtra entre partículas sólidas y un 25% que está compuesto por oxígeno y dióxido de carbono, los cuales forman el llenado total de los poros.

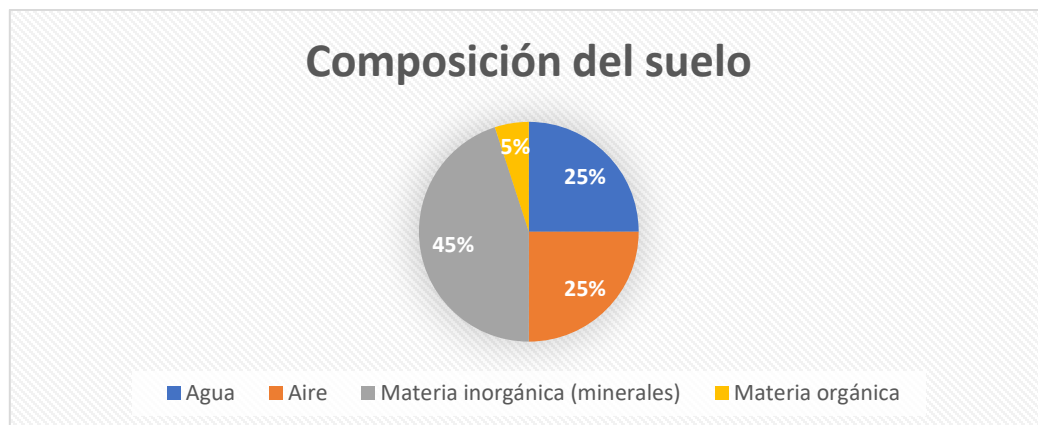


Figura 28. Composición del suelo
Fuente: Ortega (2014)





3.5 Análisis estadístico

Con el fin de conocer la calidad de la información del dispositivo, adicionalmente se realizó una comparación entre el dispositivo desarrollado y dos dispositivos comerciales (OEM®, Nahita®) respecto al porcentaje de humedad. Se utilizaron cuatro tratamientos con cinco repeticiones lo que dio 20 unidades experimentales (Figura 29); la información fue analizada mediante un diseño experimental completamente al azar.

L2	L3	L3	L1	L2	L3	L1	L4	L4	L3
L1	L4	L4	L2	L1	L4	L3	L2	L2	L1
I		II		III		IV		V	

Figura 29. Diseño en campo del experimento



Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de laboratorio

Los resultados de las propiedades físicas y químicas del suelo de las parcelas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis físico- químicos de las áreas de estudio

Comunidad	Textura				Densidad aparente		Materia Orgánica		pH	CE (µS)
	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da (gr/mL ⁻¹)	Nº Poros	% M.O.	Clase		
PRAXEDIS GUERRERO										
Sitio 1	51.48	34.52	14	Franco arcillo-arenoso	1.19	58	0.9715	Bajo	8.6	615
Sitio 2	37.48	42.52	20	Arcilloso	1.05	62	1.1524	Bajo	9.2	617
Sitio 3	41.48	38.52	20	Franco arcilloso	1.23	56	1.2127	Bajo	9.0	691
FELIPE ANGELES							1.5745	Bajo		
Sitio 4	21.48	42.52	36	Arcilloso	1.04	63			8.2	1555

En los cuatro tipos de suelos se observan diferencias en el tipo de textura, % de materia orgánica (MO), pH y conductividad eléctrica (CE). Por los valores encontrados se puede afirmar que ninguno de los suelos cumple con las condiciones de un suelo ideal para las actividades agrícolas; principalmente por su contenido de MO (bajo) y pH (alcalino).

Debido a estas características es importante implementar prácticas de mejoramiento para corregir el contenido de MO (superior al 5%), disminuir el pH (aproximadamente a 7).

Trejo *et al.* (2013) mencionan que al aplicar el estiércol de Bovino cada año incrementa la materia orgánica del suelo hasta en un 189 y 180%; lo cual demuestra la bondad del estiércol convirtiéndose en una excelente alternativa para satisfacer la demanda nutrimental del cultivo.





4.2. Determinación del tiempo óptimo de riego

El ciclo agrícola primavera- verano 2021 presentó abundantes precipitaciones que superaron el promedio estatal hasta en un 40% (de 500 mm a 700 mm), inclusive en algunas partes del estado este porcentaje fue mayor. Debido a esta circunstancia las macetas presentaron humedades superiores al 80%, incluso algunas plantas murieron por exceso de humedad. Debido a lo anterior no fue posible determinar el tiempo óptimo de riego durante un periodo aproximado de 3 meses, sin embargo, esto fue posible realizarlo hasta mediados del mes de septiembre cuando las precipitaciones cedieron y fue disminuyendo el contenido de humedad en las macetas.

Para determinar la CC y el PMP de cada uno de los suelos de las parcelas en estudio, se aplicaron las fórmulas propuestas por Peele y Briggs (2016). Estos parámetros fueron necesarios para la determinación del tiempo óptimo de riego presentados en Cuadro 3.

Cuadro 3. Cálculo de CC y PMP de los suelos aplicando las fórmulas propuestas por Peele (2016) y Briggs (2016).

Comunidad	CC %	PMP %
PRAXEDIS GUERRERO		
Suelo 1	22.64	12.61
Suelo 2	27.13	15.43
Suelo 3	25.30	14.28
FELIPE ANGELES		
Suelo 4	29.36	16.83

Para determinar el tiempo óptimo de riego en base al contenido de humedad, se programó el dispositivo para que a través de colores mostrara el grado de humedad de los suelos y de esa manera realizar una comparación con los valores sugeridos por TRAXCO en 2009 y estar en posibilidades de realizar los ajustes de los valores de humedad y tipo de color en el dispositivo. Los porcentajes de humedad y su respectivo color quedaron de la siguiente manera:

- Entre 100 y 35% _____ verde fijo (C.C.)
- Entre 34 y 22% _____ verde parpadeante (T.O.R.)
- Entre 21 y 18% _____ rojo parpadeante (P.M.P.)
- Menor de 18% _____ rojo fijo (posible muerte)





Donde:

CC: Capacidad de campo.

T.O.R: Tiempo óptimo de riego.

PMP: Punto de marchitez permanente

Con base a los valores definidos por Ortega (2014) sobre la composición para un suelo normal, se determinó que los datos mostrados por el dispositivo representan solo el 50% de los componentes, realizando un ajuste con las fórmulas propuestas por Peele y Brigs (2016), para CC, PMP y Humedad disponible (% de humedad entre CC y PMP) presentados en Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores de humedad del suelo propuestos por TRAXCO (2009) de acuerdo con la textura de suelo y con modificación por Argumedo (2022)

HUMEDAD DEL SUELO						
Textura del suelo	Capacidad de campo (%)	Lectura del dispositivo (%)	Punto de marchitamiento (%)	Lectura del dispositivo (%)	Humedad disponible (%)	Lectura del dispositivo (%)
Arenoso	9	18	2	4	7	14
Arenoso - franco	14	28	4	8	10	20
Franco arenoso - limoso	23	46	9	18	14	28
Franco arenoso + materia orgánica	29	58	10	20	19	38
Franco	34	68	12	24	22	44
Franco - arcilloso	30	60	16	32	14	28
Arcilloso	38	76	34	68	14	8
Arcilloso con buena estructura	50	100	30	60	20	40

Fuente: TRAXCO – Tecnología de Riego (2009)

Para determinar el tiempo óptimo de riego se debe localizar en el Cuadro 5 el tipo de textura del suelo, posteriormente tomar el dato de humedad presentado con el dispositivo y finalmente buscar en el cuadro el valor que corresponda al dispositivo para determinar el tiempo óptimo de riego.

Para facilitar al usuario el empleo del dispositivo es importante delimitar que los valores de humedad reportados por el dispositivo siempre se mantengan en un 20% superiores al reportado





para el PMP para cualquier tipo de suelo, para ello se deberá programar el dispositivo para que proporcione señales de alarma mediante un color específico.

Cuadro 5. Valores propuestos obtenidos con el dispositivo para determinación del tiempo óptimo de riego

Textura del suelo	Capacidad de Campo (%)	Punto de marchitamiento (%)	Humedad disponible (%)
Arenoso	18	4	14
Arenoso - franco	28	8	20
Franco arenoso - limoso	46	18	28
Franco arenoso + materia orgánica	58	20	38
Franco	68	24	44
Franco - arcilloso	60	32	28
Arcilloso	76	68	8
Arcilloso con buena estructura	100	60	40

Aunque se ha reportado cierta respuesta del cultivo cuando se ha proporcionado un riego de recuperación y posteriormente normalizado los demás riegos cuando el suelo ha llegado al PMP (Avendaño et al. 2008), esto no es recomendable ya que debido al estrés hídrico ocasionado es posible que se presente en cultivos un retraso tanto en su desarrollo como en la producción.

4.3. Comparación entre dispositivos para determinación de humedad

De un total de 600 lecturas realizadas entre el dispositivo desarrollado y dos dispositivos comerciales, en el análisis de la varianza no se observó diferencia estadística ($P > 0.05$) entre ellos (Figura 30). Se obtuvo alta correlación entre los valores de humedad obtenidos entre el dispositivo y los comerciales OEM®, y Nahita®) ($r=0.97$ y $r=0.94$, respectivamente).

Respecto a las diferencias estructurales observadas durante el proceso de validación, el prototipo mostró ventajas con relación al tamaño y resistencia de las sondas debido a que al estar diseñada de acero inoxidable mostró mayor resistencia al momento de su introducción al suelo, menor grado de desgaste y una gran tolerancia al proceso de corrosión respecto a los demás.



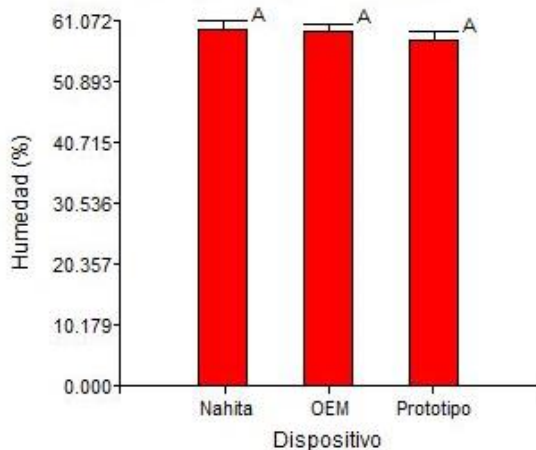


Figura 30. Lecturas promedio de humedad tres diferentes dispositivos electrónicos.

Durante el proceso de la toma de datos, otra ventaja que se observó en el dispositivo fue que, al haber sido desarrollado para operar de manera digital, originó que se obtuvieran valores más precisos, mientras que los demás al ser de tipo analógico existe el riesgo de obtener posibles errores de medición debido al ángulo de observación (Figura 31).



Figura 31. Pantallas de visualización de datos del dispositivo desarrollado, OEM® y Nahita® respectivamente

Otra ventaja favorable del dispositivo fue el tiempo de respuesta al momento de la toma de datos al otorgar lecturas más rápidas al usuario. Los promedios en segundos (s) fueron los siguientes: Prototipo: 3s, OEM®: 6s y Nahita®: 5s.

Asimismo, al estar diseñada su estructura con materiales de uso industrial, el dispositivo puede soportar inmersiones totales en líquidos durante un largo tiempo sin tener daños por la calidad del encapsulado que es del tipo IP68, estas ventajas no se observaron en los otros dispositivos evaluados.





Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron en el presente trabajo fueron:

El dispositivo se considera una buena herramienta tanto para el agricultor como para el técnico debido a que proporciona la información necesaria para determinar el tiempo óptimo de riego en las parcelas donde se cultiva maíz, sin embargo, esto podría escalarse a cualquier otro cultivo que establezcan los productores debido a que solo será necesario conocer el tipo de textura del suelo.

El estado actual del dispositivo tanto en su diseño como en la operación presenta aun posibilidades de mejora. Las modificaciones que se le podrían realizar dependerán de las experiencias que se tengan en diferentes condiciones de manejo de recurso hídrico en las parcelas y cultivos de los productores.

Por la calidad de los materiales y de los sensores, se puede denominar como un dispositivo de uso industrial. Esto es debido a que las sondas son capaces de soportar la corrosión y oxidación de la humedad, asimismo porque la calidad de encapsulado al ser IP68 soporta inmersiones totales en líquido durante gran tiempo sin dañarse.

El dispositivo al ser de tipo digital ofrece valores estabilizados que a diferencia de los de tipo analógico pudieran variar de acuerdo con el ángulo y a la posición natural del observador.





REFERENCIAS

- Anurag, D., Siuli, R., & Somprakash, B. (2008). *Agro-sense: Precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks*. Kolkata, India: Indian Institute of Management Calcutta. doi:DOI: 10.1109/KINGN.2008.4542291
- Arnó Satorra, J., Martínez Casasnovas, J. A., & Escolá i Agustí, A. (2017). ¿Que nos dicen los sensores sobre los cultivos? *New Ag International SARL, Diciembre 2017*, 16-20. doi:http://hdl.handle.net/10459.1/65426
- Avendaño Arrazate, C. H., Molina Galan, J. D., Trejo Lopez, C., López Castañeda, C., & Cadena Iñiguez, J. (2008). Respuesta a altos niveles de estres hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 19(1), 27-37. Obtenido de http://www.mag.go.cr/rev_meso/v19n01_027.pdf
- Breton, L. (2017). ¿Que nos dicen los sensores de los cultivos?, CEO de FORCE-A.
- Caisedo Rosero, L., Méndez Avila, F., Gutiérrez Zeferino, E., & Flores Cuautle, J. (2021). Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. *Padi*, 9(17), 1-8. doi: <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>
- Camba Láinez, H. M., & Villamarín Álava, G. R. (2015). *Sistema de posicionamiento e información de maquinarias pesadas y agrícolas desde un dispositivo móvil con S.O. Android utilizando metodología de desarrollo SCRUM*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- CONGOPE. (11 de 2016). Hablemos de Riego. Quito, Ecuador. Recuperado el 04 de 2022, de <http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/03/HABLEMOS-DE-RIEGO-LOW.pdf>
- Enríquez Hernández, J. A., Silva Martínez, K. L., Jahuaey Muñiz, A., & Robles Cruz, I. d. (2014). Sistema de Control Agrícola (SISCA). *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)*, (pág. 10). Guayaquil.
- Fischer, G., Carvajal, F. T., & Bazarro, J. T. (1997). Efecto de la Temperatura del suelo sobre la planta. *Comalft Vol XXIV*, 78-92.
- García Alonso, S., Gomez Gil, J., & Arribas, J. I. (2011). Evaluación del uso de receptores GPS de bajo coste en los autónomos. *Revista Española de Investigaciones Agrícolas*, 377-388. Obtenido de <https://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/1727/1430>
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de Precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*, 99 - 114.
- Gavilán, S., Pastore, J. I., Quignard, I., Marasco, N. D., & Aceñolaza, P. G. (2019). Energy balance model as real evapotranspiration estimator with satellite and meteorological data. *Interciencia*, 44(7), 400. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33960285005>
- Gutierrez Soto, M., Cadet Piedra, E., Rodríguez Montero, W., & Araya Alfaro, J. M. (2011). El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de cultivos. (U. d. Rica, Ed.)



- Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 397 - 403. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43722407016>
- Herreras, L. A., Costa, J. L., & Garcia, F. O. (1999). *Temperatura y contenido hidrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza*. Buenos Aires - Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias. Obtenido de https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_17n2/ferreras_39-45.pdf
- Hossne, G., Américo, J., Mendez, N., Leonett, F., Meneses L, J., & Gil, J. (2016). Maize root growth under regular water content, subjected to compaction, irrigation frequencies, and shear stress. (U. N. Colombia, Ed.) *Facultad Nacional de Agronomía (Medellín)*, 69(1), 7867-7880. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179943371012>
- INEGI. (2021). *Cuentame... Información de INEGI*. Obtenido de Cuentame... Información de INEGI (clima de Durango): <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/territorio/clima.aspx?tema=me&e=10#:~:text=Durango&text=El%2040%25%20del%20territorio%20presenta,es%20de%2017%C2%B0C>.
- INIFAP. (02 de 2012). *Biblioteca - Muestreo de suelos y preparacion de muestras*. Obtenido de Biblioteca - Muestreo de suelos y preparacion de muestras: <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/935.pdf>
- Lago González, C., Sepúlveda Peña, J. C., Barroso Abreu, R., Fernández Peña, F. O., Maciá Pérez, F., & Lorenzo, J. (enero-abril de 2011). Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precisión. (I. (Chile), Ed.) *Scielo Chile*, 29(1), 59-69. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v29n1/art09.pdf>
- Ortega Miranda, G. (06 de 10 de 2014). *abc - Composición y clasificación de los suelos*. Obtenido de abc - Composición y clasificación de los suelos: <http://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/composicion-y-clasificacion-de-los-suelos-1293271.html>
- Ortiz, E., & Torres, E. (septiembre - diciembre de 2018). Assessing water demand with remote sensing for two coriander varieties. (U. N. Colombia, Ed.) *Agronomía Colombiana*, 36(3), 274-283. doi:10.15446/agron.colomb.v36n3.71809
- Reyes González, A., Reta Sanchez, D., Sánchez Duarte, J., Ochoa Martínez, E., Rodríguez Hernández, K., & Preciado Rangel, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 279 - 290.
- Rosales Serna, R. (2017). *Importancia del agua de riego para la producción sostenible de frijol en Durango*. Folleto Técnico, Instituto Nacional De Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/323510747_IMPORTANCIA_DEL_AGUA_DE_RIEGO_PARA_LA_PRODUCCION_SOSTENIBLE_DE_FRIJOL_EN_DURANGO
- Ruiz Olaya, A., Barandico, A., & Guerrero, F. (Octubre de 2011). ReserchGate - Implementación de una red MODBUS/TCP. doi:<http://dx.doi.org/10.25100/iyv.v6i2.2277>





- Trasar Cepeda, C., Leirós, M. C., & Gil Sotres, F. (2008). Modification of biochemical properties by soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8(2), 53-60. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n2/art07.pdf>
- TRAXCO. (12 de 2009). *TRAXCO - Componentes para riego pivot*. Obtenido de Tecnología de Riego: <https://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/humedad-en-suelos-de-diferente-textura>
- Trejo, E., Salazar, S., López, M., & Vázquez, V. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 727 - 738. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000500006&lng=es&tlng=es.
- Urbano Molano, F. A. (2013). Redes de Sensores Inalambricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para cultivos de café en Colombia. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 5(1), 46 - 52. Obtenido de <https://jci.uniautonomo.edu.co/2013/2013-8.pdf>
- Valencia Villegas, Y., & Sepúlveda Casadiego, Y. (2019). Implementación de sensores en sistemas de riego automatizados. ECAPMA. doi:<https://doi.org/10.22490/ECAPMA.3417>
- Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2013). Interpretacion de contenido de humedad del suelo para determinar CC y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *IFAS Extension*. Recuperado el 2021, de https://www.researchgate.net/publication/345870387_Interpretacion_del_contenido_de_la_humedad_del_suelo_para_determinar_capacidad_de_campo_y_evitar_riego_excesivo_en_suelos_arenosos_utilizando_sensores_de_humedad





ANEXOS

Nomenclatura

ADP = *Agua Disponible para la Planta*
CC = *Capacidad de Campo*
CRAD = *Capacidad de Retención de Agua Disponible*
DC = *Direct Current*
DGPS = *Sistemas de Presición Gobal Diferencial*
ET = *Evapotranspiración*
EEPROM = *Electrically Erasable Programable Read Only Memory*
EGNOS = *European Geostationary Navigation Overlay System*
GAGAN = *GPS Aided Geo Augmented Navigation*
GPS = *Global Positioning System*
GNSS= *Sistemas de Navegación Global por Satélite*
GSM = *Sistema Global de Comunicaciones Móviles*
GIS = *Sistema de Información Geográfica*
I2C = *Inter-Integrated Circuit*
IEEE = *Institute of Electrical Electronics Engineers standards*
IDE = *Entorno de Desarrollo Integrado*
KB = *Kilo Byte*
LED = *Diodo Emisor de Luz*
MSAS = *Multifunctional Transport Satellite-based Augmentation System*
MHz = *Mega Hertz*
NDVI= *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*
OLED = *Diodo Orgánico Emisor de Luz*
PCB = *Bifenilos Policlorados*
PLC = *Controladores Lógicos Programables*
PMP = *Punto de Marchitez Permanente*
PWM = *Pulse Width Modulation*
RGB = *Red, Green, Blue (colores del LED)*
RTK-GPS = *Sistemas de Corrección de Posición en tiempo real*
SBUS = *Serial Bus*
SPI = *Serial Peripheral Interface*
SBAS = *Satellite Based Augmentation Systems*
TTL = *Transistor-Transistor Logic*
TIC'S = *Tecnologías de Información y Comunicación*
UART = *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*
VANT = *Vehículo Aéreo No Tripulado*
WAAS = *Wide Area Augmentation System*

