

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Programación del riego a través del uso de sensores de humedad y
monitoreo de la evapotranspiración para la aplicación de un riego deficitario
en sorgo

Estudiante

Adrian Villarreal Araúz

Asesores

José Adrián Ordoñez Bonilla, Mtr.

Raphael Wesly Colbert, Ph.D.

Jofiel Ramón Jirón Zeledón, Ing.

Honduras, agosto 2023

Autoridades

SERGIO RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos	13
Ubicación	13
Sistema de Riego.....	14
Evaluación y Monitoreo del Sistema de Riego.....	14
Caudal del Emisor	14
Marco de Emisor	15
Precipitación Instantánea	15
Tiempo de Riego	16
Cálculo de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen	17
Monitoreo del Contenido de Agua en el Suelo.....	17
Recolección de Datos.....	20
Ubicación de los Sensores.....	21
Evapotranspiración del Cultivo	21
Programación de Riego Real	22

Programación de Riego Teórica	22
Análisis de Datos	23
Resultados y Discusión	24
Evaluación y Monitoreo del Sistema de Riego.....	24
Caudal del Emisor	24
Precipitación Instantánea	25
Coefficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC).....	26
Registro de Datos Promedios Obtenidos por los Sensores de Humedad.....	27
Evapotranspiración del Cultivo	28
Programación de Riego Real	31
Programación de Riego Teórica	32
Comparación de Sistemas de Programación de Riego	33
Conclusiones	35
Recomendaciones.....	36
Referencias.....	37
Anexos.....	40

Índice de Cuadros

Cuadro 1	Datos promedios semanales de caudal y precipitación instantánea del emisor	25
Cuadro 2	Coficiente de uniformidad de Christiansen presentado de manera semanal.....	26
Cuadro 3	Datos promedios semanales de los sensores durante el periodo de riego	27
Cuadro 4	Datos promedios semanales de los sensores luego del periodo de riego hasta PMP	28
Cuadro 5	Sumatoria semanal de la Evapotranspiración del cultivo	30
Cuadro 6	Programación del riego real semanal por medio de sensores de humedad y monitoreo de la evapotranspiración	32
Cuadro 7	Programación del riego teórica por medio de datos de ET_c	33

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación del lote 21 de Zona 2 de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.	13
Figura 2 Sensor Teros 12 utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	18
Figura 3 Consola de Bluetooth utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	19
Figura 4 Datalogger de baterías utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	19
Figura 5 Datalogger con panel solar	20
Figura 6 Medición de las raíces para la toma de decisión de la ubicación en profundidad de los sensores en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	21
Figura 7 Evapotranspiración de referencia del cultivo del mes de febrero tomado de la estación meteorológica Atmos 41.....	29
Figura 8 Evapotranspiración de referencia del cultivo del mes de marzo tomado de la estación meteorológica Atmos 41.....	29
Figura 9 Comparación de láminas de agua durante el periodo de aplicación de riego en el lote de sorgo	34

Índice de Anexos

Anexo A Análisis de suelo del laboratorio de suelos Zamorano	40
Anexo B Ubicación para la instalación del panel Meter	41
Anexo C Sensor TEROS 12 instalado y ubicado en el suelo	42
Anexo D Sensor TEROS 12 instalado en el cultivo de sorgo	43
Anexo E Registro de datos para la aplicación de riego	44
Anexo F Registro de datos obtenido de los sensores de humedad	45

Resumen

En el área agrícola se están implementando técnicas para mejorar las eficiencias de riego, una de ellas es la programación a través de los sensores de humedad. Los objetivos de este estudio fueron elaborar programaciones de riego, una con base en el monitoreo de la humedad en el suelo y la evapotranspiración del cultivo (ET_c) (real) y otra, sin tomar en cuenta la humedad en el suelo (teórica); también, mantener la humedad del suelo a capacidad de campo (CC) hasta que el cultivo alcanzara el 50% de floración, para luego monitorear la humedad hasta el punto de marchitez permanente (PMP). El estudio se realizó entre enero y mayo de 2023, en un ensayo de campo en sorgo, en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Se utilizaron cintas de riego de 1 L h^{-1} y sensores Teros 11 y 12. Se registró información de los sensores, la ET_c y tiempos de riego diariamente. Se monitoreó el caudal, precipitación instantánea, coeficientes de uniformidad de Christiansen (CUC) semanalmente, para realizar ajustes en los tiempos de riego. Se obtuvo en promedio CUC de 95.8%, un caudal de 0.87 L h^{-1} y una precipitación de 4.36 mm h^{-1} . Se logró programar el riego por medio de los sensores encontrando una diferencia de $188.1 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ de agua de la programación real, comparado con la programación teórica. De igual forma, se logró mantener el suelo a CC hasta llegar al 50% de la floración del sorgo y luego se monitoreó la humedad hasta que el suelo se acercara al PMP.

Palabras clave: agua disponible, caudal de precipitación, estrés abiótico, monitoreo, riego agrícola, *Sorghum bicolor*.

Abstract

In the agricultural area, techniques are being implemented to improve irrigation efficiencies, one of them is scheduling through moisture sensors. The objectives of this study were to develop irrigation schedules, one based on monitoring soil moisture and crop evapotranspiration (ET_c) (real) and another, without considering soil moisture (theoretical); also, to maintain soil moisture at field capacity (CC) until the crop reached 50% flowering, and then monitor moisture until the permanent wilting point (PMP). The study was conducted between January and May 2023, in a field trial on sorghum at Zamorano University. Irrigation tapes of 1 L h⁻¹ and Teros 11 and 12 sensors were used. Information from the sensors, ET_c and irrigation times were recorded daily. The flow rate, instantaneous precipitation, Christiansen uniformity coefficients (CUC) were monitored weekly to adjust in irrigation times. An average CUC of 95.8%, a flow rate of 0.87 L h⁻¹ and a precipitation of 4.36 mm h⁻¹ were obtained. It was possible to program irrigation by means of the sensors, finding a difference of 188.1 m³ha⁻¹ of water in the real programming, compared to the theoretical programming. Similarly, the soil was maintained at CC until 50% of sorghum flowering was reached and then moisture was monitored until the soil approached the PMP.

Keywords: abiotic stress, agricultural irrigation, available water, flow rate, monitoring, *Sorghum bicolor*.

Introducción

La creciente población y la disminución del agua disponible para la producción agrícola son dos factores que han llevado a los productores a buscar nuevas variedades de plantas que se adapten a las actuales condiciones climáticas adversas y, al mismo tiempo, suplir la demanda mundial de estos productos. Para el 2050 se tiene previsto que habrá un déficit de granos de 450 millones de toneladas anuales, lo que crea la necesidad de buscar nuevas técnicas para aumentar la producción y obtener altos rendimientos (Pérez et al. 2010). Según La FAO (2021), a escala mundial la agricultura representa el 72% de las extracciones de aguas superficiales y subterráneas que son destinadas para riego.

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es considerado el cultivo más eficiente en cuanto al uso del agua. El requerimiento hídrico del sorgo va entre los 400 a 600 mm de agua (Morán 2023). Un 75% del sorgo cultivado a escala mundial es utilizado como alimento para el ser humano (Oramas et al. 2002). Dentro de la escala de importancia es el quinto cereal más importante del mundo y ha logrado adaptarse a climas tropicales, siendo capaz de tolerar sequías y sobrevivir a condiciones climáticas adversas (Herrera Puebla et al. 2018).

El uso eficiente del agua en el sistema de riego es de vital importancia por la competencia de este recurso entre los agricultores, la industria y la población, debido a la escasez existente provocada por el cambio climático (Risco et al. 2018). Es de vital importancia entender la aplicación de técnicas y métodos para la racionalización del agua y lograr mejorar en la programación, diseño y operación de los sistemas de riego (Palestina et al. 2017).

Los sensores de humedad son herramientas utilizadas en los sistemas de riego para tener un mejor control de la humedad del suelo y hacer más eficiente los sistemas de riego utilizados (Payán et al. 2013). Si no se toma en cuenta información como la variabilidad espacial del terreno se está propenso a obtener una baja productividad del cultivo debido a no distribuir la humedad de manera uniforme en base a los datos del lote (Castro et al. 2016).

En la actualidad, la mayor parte de los métodos de riego instalados, carecen de un sistema que sea capaz de medir la humedad del suelo, el tiempo de riego e identificar la zona del suelo que

realmente necesita ser regada. No contar con un sistema que logre medir estos parámetros es desfavorable, ya que, si no se cuenta con esta información se puede llegar a un déficit de riego que causa bajas en la producción, por otro lado, el exceso de riego es capaz de causar infertilidad permanente (Castro et al. 2016).

Al aplicar riego se tienen presente dos estados de humedad denominados capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), el porcentaje que se desea tener y que el cultivo puede absorber se encuentra entre PMP y CC. Se debe tener en cuenta que, las plantas estarán en estrés hídrico antes de llegar al PMP del suelo por lo que es imprescindible mantener un porcentaje de agua promedio en el suelo.

Para la medición del agua existen diversas metodologías, entre los cuales destacan el método gravimétrico, neutrónico y el método dieléctrico con sensor capacitivo (FDR) (Curto et al. 2016). El método gravimétrico se destaca por su exactitud y sencillez y por sus bondades es utilizado para la calibración de otros sensores de humedad (Radulovich 2009). No se recomienda para un monitoreo continuo de la humedad, ya que requiere disturbar el suelo, extraer una parte cada vez que se requiere obtener este dato y se puede tardar hasta 24 horas en obtener la información.

El método neutrónico utiliza una fuente radiactiva y consiste en contar los neutrones que han sido emitidos y han regresado al sensor por efecto de un choque contra hidrógeno existente en el suelo (Martin y Munoz 2017). No se recomienda para llevar un registro continuo ni realizar muestras poco profundas, porque requiere de personal capacitado y con permisos especiales para su uso, dado que utiliza una fuente radiactiva.

El método FDR utiliza un sensor capacitivo que mide la constante dieléctrica aparente, la cual es dependiente de su humedad. Es capaz de utilizarse para llevar un registro continuo, puesto que, los datos obtenidos tienen una alta resolución temporal. Tiene como desventaja que la representatividad del sensor es reducida a 10 cm de radio, debido a esto, están propensos a ser sensibles a irregularidades producidas al momento de la instalación y a las propiedades del suelo (Curto et al. 2016).

Con la programación de riego se busca establecer láminas de agua y fechas adecuadas durante el ciclo del cultivo. Para Figueredo F et al. (2018), al aplicar el riego se deben considerar factores fenológicos del cultivo. Al mismo tiempo, las características fisicoquímicas y biológicas del suelo que determinan la capacidad de retención de agua y la profundidad radicular ya que, con estos datos es posible determinar la cantidad de agua a utilizar en el proceso de evapotranspiración del cultivo.

Gran parte del agua que es absorbida por las plantas es evaporada a la atmósfera a través de la superficie foliar gracias a la transpiración. Por otro lado, se tiene la evaporación que corresponde a la pérdida de agua desde la superficie del suelo. La combinación de estos dos valores se les conoce como evapotranspiración (ET) que puede ser obtenida por medio del cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Según la FAO (2006), para obtener el valor de la ET_c se requiere del valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) que corresponde a un parámetro relacionado con el clima que expone el poder evaporante de la atmósfera basado en un cultivo de referencia o hipotético con características ya establecidas. También, es necesario contar con otro dato llamado el coeficiente del cultivo (K_c) el cual, es característico para cada cultivo; es funcional para realizar calendarios básicos de riego y estudios de balance hídrico.

De acuerdo con la FAO (2006), es importante recalcar que los datos climáticos que se utilizan en los cálculos de evapotranspiración, deben ser de estaciones meteorológicas que se encuentren lo más cercano al lote cultivado. En caso de no contar con una estación se debe acudir al servicio meteorológico nacional de cada país para obtener los datos climáticos (Carrazón 2007).

Los objetivos de este estudio fueron elaborar dos programaciones de riego, una con base en el monitoreo de la humedad en el suelo y la evapotranspiración del cultivo ET_c y otra, sin tomar en cuenta el monitoreo del agua en el suelo; así como mantener la humedad del suelo a capacidad de campo hasta que el cultivo alcanzara el 50% de floración, para luego monitorear la humedad hasta el punto de marchitez permanente.

Materiales y Métodos

Ubicación

El estudio se realizó de enero a mayo de 2023, en el lote 21 de Zona 2 de la Universidad Zamorano, ubicado a 30 km al sureste de Tegucigalpa, en el municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, Honduras (Figura 1). La temperatura media anual es de 26°C, y la precipitación media es de 1100 mm anuales.

Figura 1

Mapa de ubicación del lote 21 de Zona 2 de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



El lote utilizado tuvo un área de 1.1 ha. El monitoreo de la humedad del suelo se realizó mediante sensores de humedad de capacitancia en el cultivo de sorgo evaluado por tolerancia a sequía y fue sembrado el 28 de enero de 2023. Para este estudio se contó con un suelo de textura franco, información obtenida por medio de un análisis de suelo del Laboratorio de suelos de Zamorano (Anexo 1). Para los límites de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se tomaron los datos promedios según base teórica expuestos por Israelsen y Hansen (1975) para

establecer la HCC a 32% y PMP 14.2%. También, se mantuvo un factor de agotamiento del 55%, valor obtenido del documento de la FAO 56 (FAO 2006) lo cual, equivale a un porcentaje de humedad de 22.21%. Estos valores se expresan en cm m^{-1} que es equivalente a porcentaje volumétrico.

Sistema de Riego

El sistema de sistema de riego que se elija puede variar dependiendo del tipo de emisor que se utilice, el cultivo que se desee regar o la disponibilidad que haya en el lugar. Para este estudio se utilizó un sistema de riego por goteo con cintas de riego de la marca AZUD con descarga teórica de 1 L h^{-1} , una presión recomendada de uso de 15 psi y con un distanciamiento de 0.20 m entre emisor y 1 m entre laterales. La eficiencia teórica del sistema de riego fue de 90%. El agua empleada para este estudio fue extraída de una laguna de oxidación ubicada a pocos metros del lote que se utilizó. Se contó con un filtro de anillos marca AZUD de 120 mesh, con entrada y salida de 2 pulgadas de diámetro y una tasa de filtraje de $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. El motor utilizado fue un motor eléctrico de la marca Toshiba de 40 hp con bomba centrífuga superficial. Se contó con una tubería principal con un diámetro de 4 pulgadas en la parte inicial y luego se redujo a 2 pulgadas y una tubería secundaria de 2 pulgadas de diámetro.

Evaluación y Monitoreo del Sistema de Riego

Se monitoreó el sistema de riego con el fin de asegurar una aplicación adecuada de acuerdo con las condiciones del lote. Se realizó una evaluación del sistema en cuanto al caudal del emisor, precipitación instantánea, pérdidas de carga y coeficiente de uniformidad para identificar defectos o áreas de mejoras para aumentar la eficiencia de descarga de agua. Contar con las condiciones óptimas en el sistema de riego permite que la aplicación sea suministrada de manera uniforme, de acuerdo a las necesidades del cultivo, optimizando los volúmenes de agua y reduciendo las pérdidas innecesaria de agua que se suministra a los cultivos (Calero y Pilatasig 2021).

Caudal del Emisor

El caudal es necesario para determinar la cantidad de agua que descarga un emisor de la cinta de riego trabajando a una presión determinada. Se estuvo monitoreando semanalmente desde la semana anterior a iniciar el riego controlado por medio de los sensores de humedad y se utilizó para

establecer datos necesarios como la precipitación instantánea que, a la vez fue necesaria para obtener el tiempo de riego y por esta razón, fue un dato crucial para la programación del riego. Para determinar el valor de esta variable se realizó el aforo de emisores mediante un envase de plástico colocado debajo de un gotero, luego se midió el volumen usando una probeta de 1000 mL, el cual se dividió por el tiempo de 10 minutos que se estuvo llenando el envase de plástico. Para este cálculo se utilizó la ecuación 1.

$$Q = \frac{V}{t} \quad [1]$$

Donde:

Q= caudal, en litros por hora.

V= volumen, en litros.

T= tiempo en horas.

Marco de Emisor

El marco de emisor es la distancia que cubre cada emisor dado en m². Se midió la distancia entre cada emisor y la distancia entre cada cinta de riego para determinar el área de riego efectiva. Este cálculo se realizó con la ecuación 2.

$$Me = Dh \times Dsh \quad [2]$$

Donde:

Me= área de emisor, en m²

Dh= distancia entre hileras (m)

Dsh= distancia entre emisores sobre hilera (m)

Precipitación Instantánea

Esta variable indica la precipitación que está brindando el sistema en mm h⁻¹. Para mantener de manera más controlada la cantidad de agua que se riega se debe calcular la precipitación instantánea del sistema de riego. Para este estudio se realizó este cálculo con el caudal teórico de la

cinta de riego para la programación de riego teórica y luego el caudal real para la programación de riego real y para obtener los valores de esta variable se utilizó la ecuación 3.

$$Ph = \frac{Q}{Me} \quad [3]$$

Donde:

Ph= precipitación instantánea (mm h⁻¹)

Q= caudal del emisor (L h⁻¹)

Me= Marco del emisor (m²)

Tiempo de Riego

Esta variable es utilizada para determinar cuánto es la duración que se debe mantener activo el sistema de riego para aplicar la dosis de agua requerida según los datos obtenidos de los sensores de humedad. Los días de riego estipulados fueron los lunes, miércoles y sábados de cada semana. Diariamente se registró el agua perdida por medio de los sensores de humedad y la ET_c, la cantidad y el tiempo de riego fue dependiente de los datos por perdida de humedad antes mencionados. Se estableció una fracción de agotamiento extraída de la tabla creada por FAO (2006) la cual establece un 55% del total del agua disponible como el agua fácilmente aprovechable, que en este caso comprenderá desde 32% hasta 22.21% según los valores obtenidos por los sensores. Para estimar el tiempo de riego se tomó en cuenta la precipitación instantánea y la eficiencia del sistema de riego usando la ecuación 4.

$$TR = \frac{LAP}{Ph \times Ef} \quad [4]$$

Donde:

TR= tiempo de riego (h)

LAP= lámina de agua perdida* (mm)

Ph= precipitación instantánea (mm h⁻¹)

Ef= eficiencia del sistema de riego (%)

*Se debe tomar en cuenta que la lámina de agua es la ubicada a la profundidad de las raíces.

Cálculo de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen

Esta variable es incluida con el fin de asegurar la distribución uniforme del agua en todo el lote a través del sistema de riego. Se utilizó un envase de plástico que se colocó en la salida de un gotero por 10 minutos y luego esta agua recolectada se depositó en una probeta de 1000 mL para medir la cantidad de agua emitida por un gotero. Este proceso se repitió 48 veces en el lote usado para la investigación, se debe tomar en cuenta que el mínimo de repeticiones para este cálculo debe ser 16. Para determinar la uniformidad de riego que se está aplicando se utilizó la ecuación 5. Fue realizada una vez a la semana, siendo el viernes de cada semana, es decir el último día de riego de la semana para ser utilizado como valor estándar de la siguiente semana.

$$CUC = 100 \times \left(\frac{1 - \sum |X_i - X|}{X \times n} \right) \quad [5]$$

Donde:

CUC= coeficiente de uniformidad de Christiansen (%)

X_i = datos individuales, (de 1 a n)

X= promedio de todos los datos

n= número de datos

$|X_i - X|$ = valor absoluto de la diferencia entre X_i y X

Monitoreo del Contenido de Agua en el Suelo

Para este estudio se utilizaron sensores de humedad marca Meter tipo TEROS 11 y TEROS 12 (Figura 2). La marca METER es de una compañía dedicada a crear tecnologías para el área agrícola tanto de investigación como de producción. En este caso ambos sensores tienen el mismo diseño, su diferencia consiste en el dato que dan a conocer; el TEROS 11 muestra el porcentaje de humedad y la temperatura del suelo. El TEROS 12 muestra el porcentaje de humedad, la temperatura y la conductividad eléctrica en el suelo. Ambos sensores cuentan con una precisión del 97%, ofrecen el

mejor volumen de influencia en relación con el tamaño del sensor siendo menos susceptible a errores de variabilidad de suelo. El tamaño del TEROS 12 es de 9.4 cm y ofrece un volumen de área de influencia de 1 L. También, se utilizó una consola de bluetooth (Figura 3) con fuente de energía a base de dos baterías (tipo AA) para lograr extraer los datos de los sensores que no cuentan con un datalogger que almacena los datos registrados.

Se contaban con dos datalogger, los cuales son un aparato que registra los datos automáticamente de manera programada y pueden ser subidos a la nube del programa y ser vistos en una aplicación en internet llamada "ZENTRA Cloud". Uno utilizaba baterías (tipo AA) y registraba datos cada hora (Figura 4) y el otro utilizaba baterías (tipo AA), pero tenía un panel solar (Figura 5) que utilizaba para recargar las baterías que contenía y registraba los datos cada 15 minutos. Para la extracción de los datos de los sensores se necesitó una aplicación para el dispositivo móvil (celular) la cual, lleva el nombre de "ZENTRA Utility".

Figura 2

Sensor Teros 12 utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Figura 3

Consola de Bluetooth utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

**Figura 4**

Datalogger de baterías utilizado en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Figura 5

Datalogger con panel solar



Recolección de Datos

En el caso de los sensores que no contaban con un datalogger los datos fueron recolectados tres veces al día en un horario de 6:00 a.m. para el primer registro; 12:00 p.m. para el segundo registro y el último registro del día se tomó a las 6:00 p.m. El registro se inició a partir del día 17 después de siembra hasta el día 63, es decir, hasta que llegara a la etapa de floración o hasta que el cultivo completara un 50% de la floración total del lote. Diariamente se calculó la cantidad de agua perdida para estimar cuánto fue la lámina de agua que se debía regar y el tiempo requerido para suministrar la cantidad necesaria en los días estipulados para el riego. Los datos utilizados para el riego fueron los tomados a las 6:00 a.m. de cada día asignado para la actividad.

Luego de cada aplicación de riego se volvieron a registrar los datos de los sensores para obtener el valor real de aplicación de la lámina de agua y comparar si realmente el sistema de riego aportó la cantidad necesaria para suplir la necesidad del cultivo. Una vez por semana se midió el caudal y la presión del sistema para asegurar la correcta aplicación de riego. Se recopiló la información sobre la etapa del cultivo en una hoja de Excel como lo muestra el Anexo 5, la ET_c , la pérdida de agua registrada por los sensores, la lámina de agua requerida y el tiempo que se debió emplear para regar y recuperar el agua perdida.

Ubicación de los Sensores

Los sensores se ubicaron de acuerdo con el crecimiento de las raíces (Figura 6) que fueron medidas una vez por semana. El procedimiento para esta medición fue extraer una planta de sorgo, se eliminó la mayor parte de suelo adherido a las raíces, se colocó sobre un fondo blanco y con una regla métrica se midió el largo de las raíces. Los sensores se movieron a distintas profundidades a medida que el cultivo se desarrolló, mientras que, el espacio entre el sensor y las plantas fue de 5 cm. La profundidad inicial fue entre los 5 y 10 cm. A los 20 días se ubicaron entre los 15 y 20 cm de profundidad. Esto con el fin de mantener los sensores de humedad lo más cerca posible a la profundidad de las raíces del cultivo de sorgo.

Figura 6

Medición de las raíces para la toma de decisión de la ubicación en profundidad de los sensores en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Evapotranspiración del Cultivo

La evapotranspiración del cultivo se debe obtener para conocer la cantidad de agua que se ha perdido del suelo por medio de factores como la transpiración de la planta y la evaporación directa de la radiación solar. Para llevar un registro de la ET_c del cultivo se requirió obtener datos de la ET_o por medio de una estación meteorológica, para este caso este dato se obtuvo a partir de la estación meteorológica Atmos 41 ubicada aproximadamente a 1.6 km del lote de estudio, la cual, tiene como

base la ecuación FAO Penman-Monteith para registrar la ET_0 . El K_c que se utilizó para este cálculo estuvo basado en los datos suministrados por FAO (2006), los cuales son específicos para cada cultivo y para cada etapa de la planta. En este cálculo se utilizó la ecuación 6.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad [6]$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo

K_c = Coeficiente del cultivo

ET_0 = evapotranspiración de referencia

Programación de Riego Real

La programación del sistema de riego real fue realizada con base a los datos obtenidos de los sensores de humedad ubicados en el lote. Los datos se fueron recopilando en una tabla de Excel (Anexo 5) donde se anotaron también, los valores de la profundidad radicular, la lámina de agua perdida según la profundidad radicular, la precipitación instantánea, el caudal y posteriormente se calculó el tiempo de riego que se debía aplicar de acuerdo con los datos mencionados anteriormente. Adicional a esto, se estuvo monitoreando de manera diaria la evapotranspiración, valores que, también se llevaron en una tabla de Excel (Anexo 5) para compararlos con la información obtenida de los sensores de humedad y así determinar si se estaba llevando una buena programación de riego con respecto a la evapotranspiración.

Programación de Riego Teórica

La programación de riego teórica fue realizada con base a los datos de evapotranspiración. La ET_0 fue obtenida de la estación meteorológica Atmos 41, mientras que el K_c fue extraído del documento de la FAO 56, documento redactado por FAO (2006). Los datos del K_c se dividieron de acuerdo con las 4 etapas del cultivo siendo estas la etapa inicial, de desarrollo, de mediados de temporada y etapa de final de temporada. Esta programación no fue ejecutada y solamente se utilizó como punto de comparación entre el uso o no de sensores de humedad de suelo.

Análisis de Datos

La información de las condiciones climáticas se obtuvo de la estación meteorológica Atmos 41 y la información de los sensores de humedad fueron recolectados en los puntos de monitoreo. Todos estos datos se almacenaron en la aplicación Microsoft Excel versión 16.0 y fueron analizados a través de estadística descriptiva. Adicional a esto, se utilizó estadística inferencial para el análisis y comparación de las láminas de agua obtenidas mediante una prueba T con un valor de significancia de $p \leq 0.05$ utilizando como herramienta el programa Infostat versión 2020.

Resultados y Discusión

Evaluación y Monitoreo del Sistema de Riego

Las condiciones que se mantenían en el sistema de riego antes del experimento eran inadecuadas para realizar un riego eficiente. Esto debido a que no se realizó un diseño agronómico para este sistema. El caudal del emisor encontrado en las condiciones iniciales era de 0.71 L h^{-1} (Cuadro 1) mientras que, el caudal teórico del emisor era de 1 L h^{-1} . Se encontró una precipitación instantánea (Ph) de 3.56 mm h^{-1} (Cuadro 1) siendo demasiado baja en comparación a la teórica que era de 5 mm h^{-1} . A pesar de estas condiciones, el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) fue de 93% (Cuadro 2) considerándose excelente según los rangos descritos por Flóres et al. (2013) y Vargas (2008). Sin embargo, Antúnez et al. (2010) menciona que, aunque se tengan buenas condiciones de uniformidad no significa tener las condiciones óptimas en el sistema de riego. Mantener un monitoreo y realizar las correcciones adecuadas asegura altas eficiencias en el sistema, ya que, si esto no se realiza puede generar pérdidas en la eficiencia. Un mal manejo puede generar pérdidas o deterioros en el desempeño del sistema provocando pérdidas de agua de diversa naturaleza (Antúnez et al. 2010).

Caudal del Emisor

El caudal teórico del sistema era de 1 L h^{-1} , sin embargo, inicialmente no se obtenía por las condiciones hidráulicas inadecuadas del sistema de riego como la pérdida de carga en la tubería secundaria. Por lo que se requirió aumentar los sectores de riego disminuyendo el área regada, para obtener mejores presiones en las laterales y lograr obtener un caudal lo más cercano al teórico. El caudal real en la primera semana (Cuadro 1) del 13 al 19 de febrero fue de 0.71 L h^{-1} siendo el más bajo obtenido. Mientras que el caudal más alto fue de 1.02 L h^{-1} que se registró para la semana del 27 al 31 de marzo siendo el último riego registrado. El caudal óptimo fue el de la semana del 13 al 19 de marzo que registró 1 L h^{-1} , siendo igual al caudal teórico.

Cuadro 1

Datos promedios semanales de caudal y precipitación instantánea del emisor en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Caudal (L h ⁻¹)	Precipitación instantánea (mm h ⁻¹)
13-19 de febrero de 2023	0.71	3.57
20-26 de febrero de 2023	0.75	3.77
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	0.87	4.35
6-12 de marzo de 2023	0.91	4.57
13-19 de marzo de 2023	1.00	5.02
20-26 de marzo de 2023	0.84	4.18
27-31 de marzo de 2023	1.02	5.13
Promedio	0.87	4.37
C.V.%	16.17	16.17

Nota. C.V.: Coeficiente de Variación.

Es de vital importancia mantener caudales lo más cercano al nominal porque este asegura un funcionamiento eficiente y uniforme del sistema. Sin embargo, tener un caudal significativamente diferente al cual ha sido diseñado, afecta directamente la precipitación del sistema y a su vez, los tiempo de riego (Vargas 2008). Antúnez et al. (2010) comenta que, a pesar de tener un coeficiente de uniformidad alto, es necesario obtener el caudal real del sistema de riego para asegurar una alta eficiencia. Otro factor que puede afectar la descarga del emisor será la presión de las laterales de riego y esta puede ser la causa de un bajo caudal en el emisor.

Precipitación Instantánea

La precipitación instantánea varió de acuerdo con el caudal que se obtuvo de manera semanal. Este dato se calculó con la información obtenida de la semana anterior a cada riego al igual que el de caudal y CUC. Dado a los problemas hidráulicos el valor de la precipitación teórica del sistema no se alcanzaba, por lo cual, se tuvieron que hacer modificaciones para obtener el valor de precipitación teórico. En este caso, tomando en cuenta los factores mencionados anteriormente se tenía que el valor ideal para este sistema era de 5 mm h⁻¹ con una presión de 15 psi, un caudal de 1 L h⁻¹ y una distancia entre hilera de 1 m y 0.20 m entre goteros. Teniendo eso en cuenta, el valor más cercano al ideal fue de 5.02 mm h⁻¹ que se registró en la semana de 13 al 19 de marzo (Cuadro 1) siendo mayor

que, el valor 5 mm h^{-1} por 0.02 mm h^{-1} . El valor más bajo corresponde al de la semana del 13 al 19 de febrero con 3.56 mm h^{-1} .

Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC)

El cálculo obtenido del coeficiente de uniformidad de Christiansen tuvo un promedio de 95.8%. El valor mínimo obtenido fue de 93.0% el cual, corresponde a la semana del 13-19 de febrero. El valor máximo del coeficiente de uniformidad se obtuvo en la última semana de riego siendo esta la semana del 27-31 de marzo con un valor de 97.2%. Según Vargas (2008) el valor mínimo aceptable para el CU es de 87%, lo que quiere decir que, se obtuvo un rango mayor al mínimo, por otro lado, basándose en los rangos establecido por Merriam y Keller (1978) el cual establece que, valores entre el 90% y 100% son considerados excelentes, así mismo, los rangos propuestos para el coeficiente de uniformidad de Christiansen establecen como excelente valores mayores al 90% (Flóres et al. 2013) y al presentar los datos obtenidos (Cuadro 2) y determinar que todos están sobre el 90% y mantiene un promedio de 95.8% se logró establecer que los resultados del CUC se encontraron en el rango de Excelente. Estos resultados avalúan el funcionamiento adecuado y uniformidad de la aplicación del riego en todo el lote de sorgo.

Cuadro 2

Coeficiente de uniformidad de Christiansen presentado de manera semanal en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano.

Semana	CUC (%)
13-19 de febrero de 2023	93.0
20-26 de febrero de 2023	94.4
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	96.1
6-12 de marzo de 2023	95.8
13-19 de marzo de 2023	97.1
20-26 de marzo de 2023	96.6
27-31 de marzo de 2023	97.2
Promedio	95.8
C.V.%	1.60

Nota. C.V.: Coeficiente de Variación.

Registro de Datos Promedios Obtenidos por los Sensores de Humedad

En el Cuadro 3 se muestra el registro de los datos promediados de manera semanal obtenidos por medio de los sensores de humedad TEROS 11 y TEROS 12 durante el periodo en que se aplicó riego al cultivo de sorgo. Durante las primeras tres semanas la humedad media se mantuvo cercana al límite de humedad a capacidad de campo (HCC) de 32% basados en los datos promedios según base teórica de Israelsen y Hansen (1975), siendo 30.3%, 30.5% y 30.7% respectivamente. Luego fue disminuyendo progresivamente al reducir el máximo del porcentaje de humedad deseado siendo inicialmente 32% a 28%. Por esta razón, en las semanas 4, 5 y 6 el porcentaje de humedad fue de 28.7%, 27.9% y 27.4% respectivamente. En la última semana de riego el porcentaje de humedad llegó a presentar un valor de 24.2% que fue cercano al porcentaje de fracción de agotamiento que era de 22.21% basados en el porcentaje expuesto por FAO (2006).

Cuadro 3

Datos promedios semanales de los sensores durante el periodo de riego en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Humedad mínima (%)	Humedad media (%)	Humedad máxima (%)	C.V.%
13-19 de febrero de 2023	25.8	30.3	33.6	8.3
20-26 de febrero de 2023	26.9	30.5	34.2	8.8
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	28.9	30.7	33.0	3.9
6-12 de marzo de 2023	27.2	28.7	30.9	4.0
13-19 de marzo de 2023	25.8	27.9	30.8	5.1
20-26 de marzo de 2023	24.1	27.4	30.9	7.4
27-31 de marzo de 2023	22.4	24.2	26.7	8.8
Promedio	25.9	28.5	31.4	

Nota. C.V.: Coeficiente de Variación.

En el Cuadro 4 se puede observar el comportamiento de la humedad del suelo luego del último riego aplicado que fue el 31 de marzo hasta llegar a punto de marchitez permanente (PMP). Hubo un descenso constante de la humedad a partir de la semana del 1 al 2 de abril con 23.1% hasta la semana del 8 al 10 de mayo con 17% de humedad. En ausencia de una fuente de agua, la humedad presente en la zona radicular se verá reducida por el consumo de la planta. A medida que se reduce la cantidad de agua en el suelo, esta será retenida con mayor fuerza por las partículas de suelo hasta llegar al

PMP. A pesar de que existe agua disponible hasta llegar al PMP, la cantidad de agua que la planta pueda extraer se reducirá significativamente antes de llegar al PMP, al mismo tiempo, será retenida con mayor fuerza a la matriz del suelo y más difícil de extraer, por lo que no podrá ser transportada hacia las raíces con la suficiente velocidad para satisfacer la demanda hídrica de la planta (FAO 2006).

Cuadro 4

Datos promedios semanales de los sensores luego del periodo de riego hasta PMP en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Humedad mínima (%)	Humedad media (%)	Humedad máxima (%)	C.V.%
1 al 2 de abril de 2023	19.4	23.1	24.8	8.8
3-9 de abril de 2023	18.8	21.3	23.5	6.3
10-16 de abril de 2023	17.7	18.9	20.8	5.3
17-23 de abril de 2023	17.1	18.0	19.5	4.9
24-30 de abril de 2023	16.7	17.5	18.7	4.6
1-7 de mayo de 2023	16.3	17.2	18.4	4.7
8-10 de mayo de 2023	16.1	17.0	18.2	5.1
Promedio	17.4	19.0	20.6	

Nota. C.V.: Coeficiente de Variación.

Evapotranspiración del Cultivo

Este dato fue considerado tanto en la programación de riego teórica como la real. Se utilizó el dato de Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_0) (Figura 7 y 8) que fue registrado de manera diaria y extraído de la estación meteorológica Atmos 41.

Figura 7

Evapotranspiración de referencia del cultivo del mes de febrero tomado de la estación meteorológica Atmos 41 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

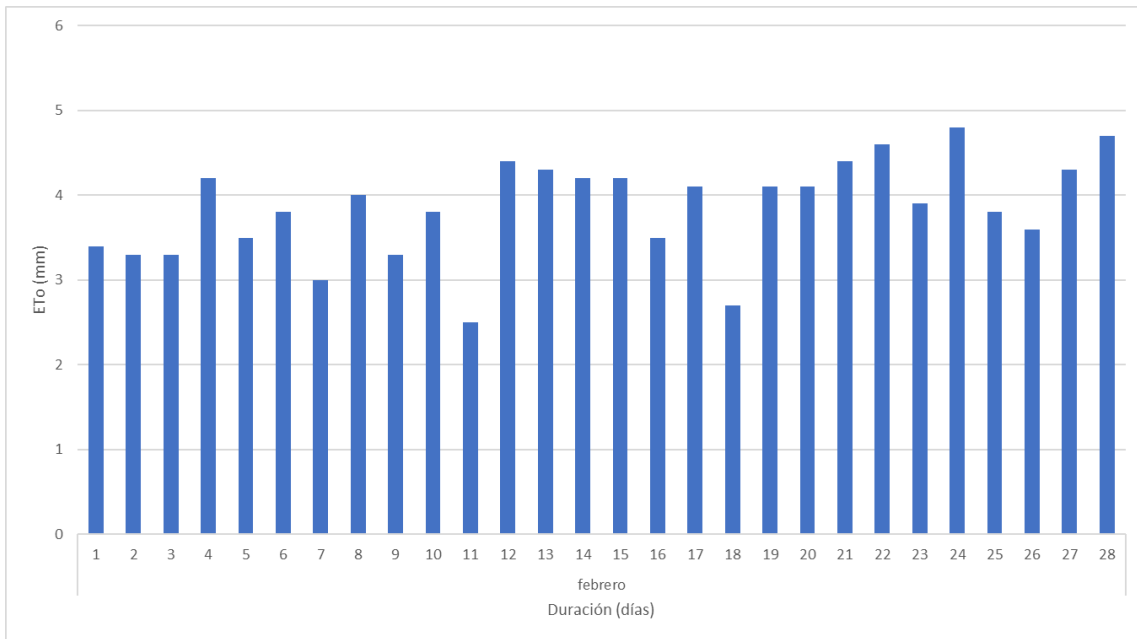
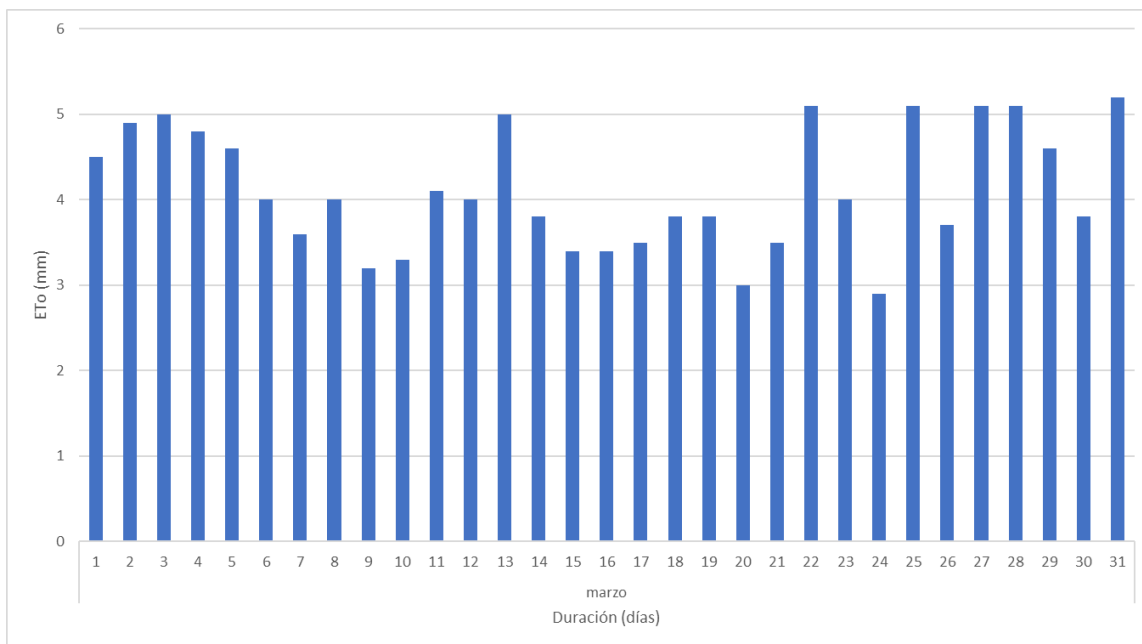


Figura 8

Evapotranspiración de referencia del cultivo del mes de marzo tomado de la estación meteorológica Atmos 41 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



En el Cuadro 5 se presenta un resumen semanal de la evapotranspiración del cultivo. La primera semana del 13 al 19 de febrero de 2023 registró una sumatoria de la ET_c de 8.6 mm/día siendo la más baja durante todo el periodo de riego tomando en cuenta que en las etapas iniciales del cultivo mantiene un K_c bajo de 0.32 como se muestra en el Cuadro 5. Siguiendo el efecto del K_c hacia la ET_c durante todo el periodo de riego, se nota un aumento de la ET_c entre las semanas del 20 al 26 de febrero y del 27 de febrero al 5 de marzo de 2023 con 13.1 y 19.7 mm semana⁻¹ respectivamente. Sin embargo, hubo una pequeña disminución en la ET_c para la semana del 6 al 12 de marzo presentando un valor de 19.6 mm semana⁻¹. En la semana posterior que fue la del 13 al 19 de marzo hubo un considerable aumento de la ET_c de 24 mm semana⁻¹. Así continuó aumentando en la semana del 20 al 26 de marzo con 28.2 mm semana⁻¹, cabe recalcar que esta fue la que presentó el dato más alto en todo el periodo de riego. La última semana de riego que fue la del 27 al 31 de marzo presentó una baja en la ET_c con 25 mm semana⁻¹ debido a que, esta semana solo recopiló datos del lunes al viernes, por ende, abarcó dos días menos que las semanas anteriores.

Cuadro 5

Sumatoria semanal de la Evapotranspiración del cultivo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Duración (días)	Promedio ET_o (mm día ⁻¹)	K_c promedio semanal	Sumatoria ET_c (mm semana ⁻¹)
13-19 de febrero de 2023	7	3.87	0.32	8.6
20-26 de febrero de 2023	7	4.17	0.45	13.1
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	7	4.69	0.6	19.7
6-12 de marzo de 2023	7	3.74	0.75	19.6
13-19 de marzo de 2023	7	3.81	0.9	24.0
20-26 de marzo de 2023	7	3.9	1.03	28.2
27-31 de marzo de 2023	5	4.76	1.05	25.0
Total				138.3

Nota. ET_o : Evapotranspiración de referencia; K_c : Coeficiente del cultivo; ET_c : Evapotranspiración del cultivo.

Tal como menciona la FAO (2006), los valores del K_c varían según la etapa de desarrollo del cultivo aumentando desde la etapa inicial hasta la etapa de mediados de temporada. También hace referencia a la ET_c la cual, es dependiente de los valores del k_c y de la ET_o y que variará de acuerdo con las condiciones del ambiente y del cultivo. En la etapa inicial del cultivo, cerca del 100% de la

evapotranspiración ocurre por la evaporación, pero cuando la cobertura vegetal aumenta, más del 90% de la evapotranspiración se da por transpiración del cultivo (FAO 2006). La evapotranspiración reúne las variables climáticas por medio de la ET_0 y las variables del cultivo por medio del K_c (Herrera et al. 2018).

Programación de Riego Real

Durante la programación de riego se fue modificando el tiempo de riego de acuerdo con los datos registrados por medio de los sensores de humedad distribuidos en el lote de sorgo. A la vez, se monitoreó la evapotranspiración (Cuadro 5), dato que fue utilizado como referencia para la programación y el comportamiento de la humedad en el suelo. La frecuencia de riego semanal fue de 2.33 días, es decir, 3 días a la semana siendo los lunes, miércoles y viernes. Cada día tuvo un tiempo distinto por efecto de las variaciones en la evapotranspiración de las plantas y la evaporación directa a través del suelo.

En las primeras tres semanas del 13 de febrero al 5 de marzo (Cuadro 6) el tiempo de riego fue inferior a las 4 horas con una lámina de riego que no sobrepasó los 17 mm. Posteriormente, se incrementó el tiempo de riego desde la semana del 6 al 12 y 13 al 19 de marzo con 4.33 y 5.18 horas respectivamente por efectos del incremento del requerimiento hídrico del sorgo y la evapotranspiración diaria aumentando la lámina de riego aplicada hasta 20.69 y 23.72 mm respectivamente. En la semana del 20 al 26 de marzo hubo una disminución del tiempo por efectos de precipitación, ya que el suelo mantenía una humedad adecuada, por lo tanto, el riego de esa semana fue solo para mantener la humedad en el lote y se aplicó 12.48 mm. Sin embargo, para la semana del 27 al 31 de marzo que fue la última semana de riego hubo un aumento considerable en la evapotranspiración (Cuadro 5) lo que causó que, se tuviera que regar mayor cantidad, por ende, mayor tiempo de riego siendo de 5.86 horas y una lámina aplicada de 27.61 mm. Esto dio un total de 28.59 horas de riego y una lámina aplicada 128.68 mm.

Abrisqueta (2010), González et al. (2011) y Zavala et al. (2021) concuerdan en que, el uso de los datos de evapotranspiración debe ser considerado en la programación de riegos si se desea tener

mejores resultados en la producción con la intención de conocer con más exactitud el requerimiento hídrico del cultivo.

Cuadro 6

Programación del riego real semanal por medio de sensores de humedad y monitoreo de la evapotranspiración en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Tiempo de riego (h)	Lámina aplicada bruta (mm)	Frecuencia de riego (días)
13-19 de febrero de 2023	3.67	14.30	2.33
20-26 de febrero de 2023	3.17	12.93	2.33
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	3.50	16.96	2.33
6-12 de marzo de 2023	4.33	20.69	2.33
13-19 de marzo de 2023	5.18	23.72	2.33
20-26 de marzo de 2023	2.88	12.48	2.33
27-31 de marzo de 2023	5.86	27.61	2.33
Total	28.59	128.68 ^a	2.33

Nota. a. Lámina aplicada durante 47 días del ciclo del cultivo.

Programación de Riego Teórica

A medida que se registró la ET_c diaria se fue creando una programación de riego teórica (Cuadro 7) para determinar la frecuencia de riego semanal tomando en cuenta la parte de evapotranspiración del cultivo (Cuadro 5). La primera semana que fue la semana del 13 al 19 de febrero fue la que presentó un menor tiempo de riego con 0.57 horas y por ende una menor lámina de riego con 2.83 mm. Esto debido al bajo requerimiento hídrico del sorgo, ya que para la primera semana aún se encontraba en la etapa inicial del cultivo. La semana del 20 al 26 de marzo fue la que presentó el más alto requerimiento hídrico con 35.08 mm con un tiempo de riego de 7.02 horas. Las semanas que presentaron un valor de 7 en la frecuencia de riego fueron frecuencias bajas con una aplicación por semana y el valor de 2.33 representó frecuencias altas de riego con 3 aplicaciones por semana. Es importante mencionar que, para la semana del 20 al 26 de marzo hubo una precipitación de 11.84 mm.

Cuadro 7

Programación del riego teórica por medio de datos de ET_c en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Semana	Tiempo de riego (h)	Lámina teórica (mm)	Frecuencia de riego (días)
13-19 de febrero de 2023	0.57	2.83	7.00
20-26 de febrero de 2023	2.09	10.47	7.00
27 de febrero al 5 de marzo de 2023	4.48	22.42	3.50
6-12 de marzo de 2023	4.98	24.89	3.50
13-19 de marzo de 2023	5.16	25.80	3.50
20-26 de marzo de 2023	7.02	35.08	2.33
27-31 de marzo de 2023	5.20	26.02	3.50
Total	30.78	147.50^a	4.33

Nota. a. Lámina teórica durante 47 días del ciclo del cultivo.

Comparación de Sistemas de Programación de Riego

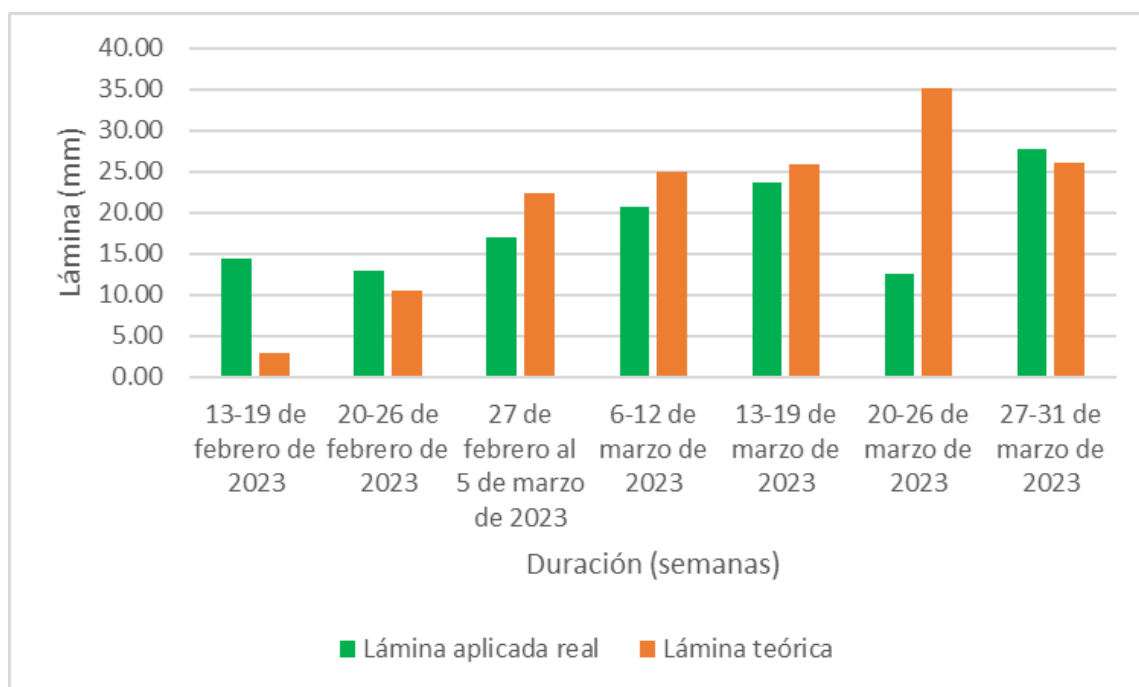
Al realizar una comparación entre los dos sistemas de programación de riego elaborados, por medio de una prueba T se determinó que no hubo diferencia significativa entre ambas láminas. Sin embargo, es posible observar que la lámina de riego aplicada (Cuadro 6) fue de 128.68 mm y la lámina de riego teórica (Cuadro 7) fue de 147.50 mm, dando como resultado una diferencia de 188.2 m³ ha⁻¹ esto, a su vez, equivale a un ahorro de agua del 12.76% siendo la programación de riego real la que tuvo un menor uso del agua. Así mismo, se puede observar en la Figura 9, la comparación de ambas láminas de agua distribuidas a lo largo del periodo de riego. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ferrándiz (2017) quien menciona que, el consumo de agua registrado por medio de la programación de sensores de humedad es menor en todo momento que el esperado mediante el cálculo del balance hídrico que fue obtenido por medio de datos meteorológicos.

Resultados similares fueron obtenidos por Castro (2008), quien indica que la programación de riego por medio de sensores de humedad utilizó menos agua que la aplicación bajo la estrategia de riego de balance hídrico con el uso de una estación meteorológica. Estudios realizados por Vélez et al. (2011) muestran resultados, en donde, tuvo un ahorro de agua en un 33% con respecto al requerimiento hídrico de la planta establecido por medio de la evapotranspiración y sin afectar en los rendimientos de la cosecha. Un estudio sobre la comparación de la programación de riego por medio

de dos sensores capacitivos y otra por medio de datos climáticos fue realizada por Fernández (2018), donde reflejaron resultados similares entre los sensores, pero registró una mayor aplicación de agua en la programación de riego con los datos climáticos. Como resultado se obtuvo un ahorro en aplicación de agua hasta de un 41.2% comparado con la programación con datos climáticos. Según los resultados obtenidos por Lagunas (2013), tanto la programación de riego por medio de sensores de humedad como por los datos de evapotranspiración es posible obtener buenas producciones, con calidad adecuada y alta eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, para aumentar la eficiencia obtenida en la programación con base en datos de evapotranspiración recomienda unir ambos métodos, ya que, pudo encontrar un exceso de aplicación de agua en los primeros estadios del cultivo, como al momento de eventos de lluvia, en donde, los sensores de humedad si captaron el aumento de humedad en el suelo y redujeron el requerimiento hídrico en ambos eventos ocurridos, mientras que, la programación por medio del cálculo de la evapotranspiración no fue capaz de percibir con exactitud este aumento de humedad en el suelo.

Figura 9

Comparación de láminas de agua durante el periodo de aplicación de riego en el lote 21 de zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Conclusiones

Se logró desarrollar una programación de riego teórica, la cual se comparó con la programación de riego real, obteniendo una diferencia de $188.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ siendo la programación de riego real la que obtuvo un menor volumen de agua, en comparación a lo que teóricamente se debió aplicar.

Se logró desarrollar y ejecutar una programación de riego real manteniendo una humedad estable a capacidad de campo hasta que el cultivo alcanzó el 50% de floración, posteriormente fue posible registrar el comportamiento de la humedad del suelo hasta acercarse al punto de marchitez permanente.

Recomendaciones

Realizar un monitoreo constante del caudal para asegurar que los tiempo de riego sean los adecuados.

Realizar el mismo estudio en un cultivo que esté destinado a producción para contar con condiciones lo más similares a una producción comercial.

Se recomienda realizar estudios posteriores donde se incluya este sistema de riego con sensores de humedad comparado con una programación de un sistema de riego teórico y otro basado en programaciones empíricas.

Referencias

- Abrisqueta I. 2010. Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario [Tesis doctoral]. Murcia: Universidad de Murcia; [consultado el 6 de jul. de 2023]. https://www.researchgate.net/profile/isabel-abrisqueta-2/publication/50402607_balance_hidrico_y_respuesta_del_melocotonero_extratemporno_al_riego_deficitario.
- Antúnez A, Mora D, Felmer S. 2010. Región de O'higgins: Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el seco. *Tierra Adentro*; [consultado el 29 de jun. de 2023]. 88:40–43. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/5140>.
- Avilés H. 2006. El valor del agua en la agricultura. *La Granja*. 5(1):28–31. doi:10.17163/lgr.n5.2006.05.
- Calero N, Pilatasig M. 2021. “Diseño agronómico e hidráulico para la implementación de un sistema de riego por aspersión en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) de variedad ccn51” [Proyecto de investigación]. Ecuador, La Maná: Universidad Técnica de Cotopaxi. spa; [consultado el 2 de jul. de 2023]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7719>.
- Carrazón J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego: Programa especial para la seguridad alimentaria (PESA). Honduras: FAO (Tecnologías); [consultado el 28 de jun. de 2023]. <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r133119.pdf>.
- Castro M. 2008. Desarrollo de un sistema de riego automatizado en tiempo real con base en balance hídrico climático, medición de humedad del suelo y lisímetro [Tesis]. Montecillo, Texcoco, Edo. de México: Campus Montecillo, Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Spanish; [consultado el 2 de jul. de 2023]. <http://193.122.196.39/xmlui/handle/10521/1513>.
- Castro N, Chamorro L, Viteri C. 2016. Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 33(2):106–116. doi:10.22267/rcia.163302.57.
- Curto L, Covi M, Gassmann MI, Cambareri M, Della Maggiora A. 2016. Calibración de datos observados de contenido de agua en el suelo con sensores capacitivos. *Meteorologica*; [consultado el 1 de feb. de 2023]. 41(2):49–63. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2016000200003&lang=es.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para determinación los requerimientos de agua de los. [sin lugar]: Food & Agriculture Org. 298 p. (Estudio FAO Riego y Drenaje; vol. 56). ISBN: 9253042192; [consultado el 28 de jun. de 2023]. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Sistemas al límite. Roma: FAO. ISBN: 978-92-5-135423-0; [consultado el 18 de jun. de 2023].
- Fernández A. 2018. Comparación entre dos tipos de sensores de humedad de suelo para la programación del riego. Aplicación en un cultivo de caqui Rojo Brillante en la comarca de la Ribera Baja de la Comunidad Valenciana [Trabajo de fin de maestría]. España: Universitat politècnica de valencia. Español; [consultado el 7 de jul. de 2023]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/101253>.
- Ferrándiz J. 2017. Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad [Trabajo fin de grado]. España: Universidad Miguel Hernández de Elche. spa; [consultado el 2 de jul. de 2023]. <http://dspace.umh.es/handle/11000/4187>.

- Figueredo F, Chipana R, Chipana G. 2018. Riego deficitario controlado mediante sensores en tres variedades de papa (*Solanum tuberosum*) en la estación experimental Choquenaira. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales; [consultado el 30 de ene. de 2023]. 5(2):7–15. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182018000200003&lang=es.
- Flores M, Flores F, Velasco V. 2015. Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. Tecnología y ciencias del agua; [consultado el 28 de ene. de 2023]. VI(5):75–88. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1171/pdf>.
- Flóres N, Zution I, Rodrigues D, Agnellos A, Ponciano F, Maycon D, Eiji E. 2013. Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. Agrociencia; [consultado el 29 de jun. de 2023]. 47(2):107–119. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-31952013000200001&script=sci_arttext.
- González F, Herrera J, López T, Cid G. 2011. Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento. Agrociencia; [consultado el 6 de jul. de 2023]. 20(1):40–46. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s2071-00542011000100008&script=sci_arttext&lng=pt.
- Herrera J, González F, Díaz Y. 2018. Consumo de agua y coeficientes de cultivo en el sorgo de grano (*Sorghum vulgare* L. Monech). Revista Ingeniería Agrícola; [consultado el 6 de jul. de 2023]. 8(3):25–30. <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/iagric/article/view/973>.
- Herrera Puebla J, González Robaina F, Díaz Pérez Y, Delgado Acosta R, López Seijas T, Cid Lazo G. 2018. Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. Revista Ingeniería Agrícola; [consultado el 6 de feb. de 2023]. 8(1):3–12. <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAagric/article/view/845/959>. doi:10.13140/RG.2.2.28326.32325.
- Israelsen OW, Hansen VC. 1975. Principios y aplicaciones del riego. 2ª ed. Barcelona: Reverte. 396 p. ISBN: 8429110305; [consultado el 1 de jul. de 2023].
- Lagunas A. 2013. Evaluación del manejo del riego por medio de sensores de humedad del suelo en un cultivo de tomate para industria [Investigación]. España: Universidad pública de Navarra. spa; [consultado el 7 de jul. de 2023]. <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/7165>.
- Martin EC, Munoz C. 2017. Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿Cuándo? Arizona: College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). es; [consultado el 6 de feb. de 2023]. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/625275>.
- Merriam J, Keller J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A Guidefor Management. 3ª ed. Logan, Utah: Department of Agricultural and irrigation Engineering ; [consultado el 21 de jun. de 2023]. [https://www.google.com/search?q=Merriam%2C+J.L.+%26+Keller%2C+J.+1978.+Farm+Irrigation+System+Evaluation%3A+A+Guidefor+Management+\(p.+271\).+Agricultural+and+Irrigation+Engineering+Department%2C+Utah+State+University%2C+Logan%2C+UT&rlz=1C1CHBD_esHN883HN883&oq=Merriam%2C+J.L.+%26+Keller%2C+J.+1978.+Farm+Irrigation+System+Evaluation%3A+A+Guidefor+Management+\(p.+271\).+Agricultural+and+Irrigation+Engineering+Department%2C+Utah+State+University%2C+Logan%2C+UT&aqs=chrome.69i57.593j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Merriam%2C+J.L.+%26+Keller%2C+J.+1978.+Farm+Irrigation+System+Evaluation%3A+A+Guidefor+Management+(p.+271).+Agricultural+and+Irrigation+Engineering+Department%2C+Utah+State+University%2C+Logan%2C+UT&rlz=1C1CHBD_esHN883HN883&oq=Merriam%2C+J.L.+%26+Keller%2C+J.+1978.+Farm+Irrigation+System+Evaluation%3A+A+Guidefor+Management+(p.+271).+Agricultural+and+Irrigation+Engineering+Department%2C+Utah+State+University%2C+Logan%2C+UT&aqs=chrome.69i57.593j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8).
- Morán A. 2023. Manual para el cultivo de sorgo en Honduras. 1ª ed. Tegucigalpa, Honduras: DICTA. 25 p. ; [consultado el 4 de jul. de 2023].

- Oramas G, Lourdes Vadés L, Hernández L, Queri O, García N, Sánchez M, González A. 2002. Informe de nuevas variedades ISIAP Dorado, primera variedad de sorgo de grano blanco para consumo humano en Cuba. *Cultivos tropicales*; [consultado el 5 de feb. de 2023]. 23(4):75. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/630/pdf>.
- Oswald U. 2011. Retos de la investigación del agua en México. 1ª ed. Cuernavaca, Morelos: UNAM (Multidisciplina; vol. 8). ISBN: 978-3-926979-81-0; [consultado el 28 de jun. de 2023].
- Palestina M, Tijerina L, Medina G, Palacios O, Flores H. 2017. Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. *Remexca*. 8(2):423–430. doi:10.29312/remexca.v8i2.61.
- Payán S, Morales A, Valdez B, Martín M, Ibarra F. 2013. Programación del riego en vid (*Vitis vinifera* L.) de mesa "Perlette" y "sugraone" con sensores de humedad. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. XIX(2):163–172. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60927902003>. doi:10.5154/r.rchsh.2012.04.024.
- Pérez A, Saucedo O, iglesias J, Wencomo HB, Reyes F, Oquendo, G, Milián, Idolkys. 2010. Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*; [consultado el 29 de ene. de 2023]. 33(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0864-03942010000100001.
- Radulovich R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *RAC*; [consultado el 6 de feb. de 2023]. 33(1):121–124. es. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6739>.
- Risco D, Gutiérrez A, Val J, León J, Díaz A, Benalcázar P, Prieto H. 2018. Programación de riego en brócoli (*Brassica oleracea* L. cv. itálica) en los Andes ecuatorianos. *Idesia*. 36(1):57–63. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292018000100057&lang=es. doi:10.4067/S0718-34292018000100057.
- Vargas A. 2008. Evaluación de la uniformidad de distribución del agua de seis cintas de goteo en condiciones de El Zamorano [Proyecto Especial de Graduación]. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. spa; [consultado el 29 de jun. de 2023]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/5481>.
- Vélez J, Intrigliolo D, Castel J. 2011. Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y de la planta. *UDCA. Actualidad y divulgación científica*; [consultado el 6 de jul. de 2023]. 14(2):65–73. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0123-42262011000200007&script=sci_arttext.
- Zavala F, Reyes A, Álvarez V, García M, Rodríguez V, Preciado P. 2021. Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra*. 39:1–14. doi:10.28940/terra.v39i0.954.
- Zotarelli L, Dukes MD, Morgan KT. 2013. Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *EDIS*. 2–4. doi:10.32473/edis-ae496-2013.

Anexos

Anexo A

Análisis de suelo del laboratorio de suelos Zamorano

ZAMORANO		ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO													
LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS					ANÁLISIS DE SUELOS					Versión					
Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025															
Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra				Página								
UIDC	2023-01-12	2023-02-13	Lote 21, Zona 2				1 de 2								
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°				Anexo Recomendación								
EAP Zamorano	2023-01	Maíz	2023-012				Sí:		No:		X				
Código Interno Lab.	Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H ₂ O)	%			Elementos menores (mg kg ⁻¹)					
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N _{total}	Cu	Fe	Mn	Zn		
23-S-0260	Lote 21 Zona 2	Franco	44	40	16	6.73	0.77	1.32	0.07	2.1	372	131	1.2		
Rango Medio							1.20 2.30	2.00 4.00	0.10 0.20	1.7 6.5	56 112	28 112	1.7 3.4		
Código Interno Lab.	Identificación de la muestra	Complejo de cambio (mg kg ⁻¹)				cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ CICE	Saturación de bases (%)				Relaciones iónicas				mg kg ⁻¹ P
		Ca	Mg	K	Na		Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	Ca+Mg/K	
23-S-0260	Lote 21 Zona 2	1781	175	468	117	12.05	73.88	11.98	9.93	4.21	6	1	7	9	94
Rango Medio		1000 2500	180 250	150 280	< 230	10 20	55 70	15 20	3 5	< 5	3 6	8 10	15 30	20 40	13 30

Alto
Medio
Bajo

Métodos: K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn, Zn: Solución extractora Mehlich 3, determinados por espectrofotometría de absorción atómica. P: Solución extractora Mehlich 3, determinado por colorimetría. % Carbono Orgánico: Método de Walkley & Black para suelos minerales no salinos. % N total: 5% de M.O. pH: 1:1 en agua: AOAC 994.16 rango de 4.00-10.00. Textura: Método de Bouyoucos. B, S: determinados por colorimetría.

*Valores de pH en negrita y cursiva se encuentran dentro del Ensayo Acreditado: Ver alcance N° ENS-004 en

oha.hondurascalidad.org



El laboratorio no se hace responsable por el estado de la muestra al ingresar a nuestras instalaciones. Los resultados se relacionan solo con las muestras recibidas. El laboratorio se exonera de responsabilidad por reproducción parcial o total del informe, o el uso que pueda darsele. El lote de análisis remite la fecha de ejecución de análisis

Anexo B

Ubicación para la instalación del panel Meter en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



Anexo C

Sensor TEROs 12 instalado y ubicado en el suelo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano



Anexo D

Sensor TERSO 12 instalado en el cultivo de sorgo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.



