

Validación de la Canaleta de Demanda Inteligente como control de riego
utilizando sondas capacitivas, en tomate (*Solanum lycopersicum*) var.
Gladiator en sistema hidropónico bajo invernadero

Carlos Luis Huertas Blanco

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIATURA EN AGRONOMÍA

ESCUELA DE AGRONOMÍA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

2019

**Validación de la Canaleta de Demanda Inteligente como control de riego
utilizando sondas capacitivas, en tomate (*Solanum lycopersicum*) var.
Gladiador en sistema hidropónico bajo invernadero.**

Carlos Luis Huertas Blanco

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DEL INGENIERO
AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIATURA EN AGRONOMÍA

_____	Director de tesis
Freddy Soto Bravo, Ph.D.	
_____	Miembro del tribunal
Francisco Marín Thiele, Lic.	
_____	Miembro del tribunal
Luis Calvo Gamboa, M.Sc.	
_____	Miembro del tribunal
Mario Savorio , M. Sc.	
_____	Director de Escuela de Agronomía
Luis Gómez Alpízar, Ph.D.	
_____	Sustentante
Carlos Luis Huertas Blanco	

San José, 2019

Dedicatoria

A Dios, a mi familia, y a los agricultores de Zarcero.

Dedico especialmente este trabajo a mis abuelos, fuente de sabiduría, amor y
servicio a la naturaleza.

Carlos Luis Huertas B.

Charlie

Agradecimientos

A Dios por permitirme vivir esta experiencia tan enriquecedora y de aprendizaje, por darme salud para asistir cada día a la estación y poder crear un proceso en pro de mejoras para los cultivos y trabajo de los agricultores.

A mis papás Carlos y Magdalena, mis hermanos Luis, Madeleine, Angela, Santiago, Dilan, Edward y a mi esposa Monserrat, por tener fe en mí y en mi proyecto. Por ser apoyo incondicional en cada etapa de este camino.

A la Universidad de Costa Rica por brindarme el apoyo y recursos para formarme como un profesional y con bases sólidas de conocimientos que llevaré a cada agricultor que lo requiera.

Al equipo de Zarcero Agrícola en especial Pablo y Cintia, por el apoyo brindado para finalizar mi proyecto.

A la empresa CAMPBELL SCIENTIFIC por el préstamo del equipo requerido para todo el proceso que implicó esta investigación. A FITTACORI por el financiamiento brindado para esta investigación.

Al técnico Julio Vega de la Estación Experimental Fabio Baudrit por todo su apoyo, paciencia y sobre todo por su compromiso con esta investigación, sin usted no sería posible esta investigación. Agradezco inmensamente permitirme aprender de su sabiduría.

A mi amigo Andrés Oviedo por todo su apoyo y colaboración esta investigación, asistentes y amigos Josué Duarte, Omar Solano, Sharon Badilla, Eric Chaves, Daniela Molina, Andrea Venegas, Fiorella García y como no a

Carolina Calderón, por todo la ayuda. A Daniel Pacheco por juntos empezar y juntos terminar nuestros proyectos de graduación a pesar de las dificultades.

A Ph.D Luis Gómez y Ph.D Arturo Brenes por su apoyo incondicional y brindarme la oportunidad de aprender de sus valores, trayectorias y experiencias desde el inicio de mi carrera.

A mi director de tesis Ph.D. Freddy Soto Bravo y el tribunal presente en mi defensa: Lic. Francisco Marín Thiele, M.Sc. Luis Calvo Gamboa, Ph.D. Luis Gómez Alpízar y Mario Savorio, M. Sc.

A mi amigo y compañero Francisco Rivas por arriesgarse a probar sus conocimientos en un área distinta, por creer en mí y en este proyecto.

A todos muchas gracias y que Dios los bendiga.

Carlos Luis Huertas B.

Charlie

Índice

Índice de cuadros	8
Índice de figuras:	10
Resumen	13
Introducción	15
Objetivos	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
Revisión de literatura	19
El cultivo de tomate	19
Importancia mundial	19
Importancia nacional	19
Requerimientos climáticos del Tomate	20
Factores que impulsan al uso de la hidroponía	22
La problemática nacional del agua y el cambio climático	22
Hidroponía	23
Ventajas del uso de la hidroponía	24
Desventajas	25
Eficiencia de uso de agua (EUA)	25
Antecedentes de la Eficiencia de Uso del Agua	26
Control automático de fertirriego	28
Definición de controlador automático	28
Antecedentes de los controles automáticos inteligentes	28
Herramientas que se pueden utilizar en controladores automáticos para determinar la frecuencia de riego	30
Tensiómetros	30
Tensiómetros en sustratos	30
Sondas capacitivas dieléctricas	31
Constante dieléctrica	31
Sensor dieléctrico GS3	32
Calibración de sondas dieléctricas	32

Humedad y parámetros para el manejo del agua en tomate	33
Calibración <i>In situ</i> : Potencial mátrico y humedad volumétrica (θ).....	35
Frecuencia de riego	36
Riegos horarios.....	36
Riegos por demanda	37
Demanda por temperatura acumulada.....	37
Demanda por radiación acumulada	37
Demanda por humedad del suelo o sustrato.....	38
Demanda por nivel	38
Volumen de riego.....	38
Medición de la ET por balance de agua	39
Lisímetros	40
Control de drenaje	41
Algoritmo de control de drenaje	41
Canaleta de demanda Inteligente	41
Valoración económica	42
Costos variables	42
Programa Power Bi.....	42
Materiales y métodos	43
Material vegetal	46
Generalidades y manejo agronómico del cultivo.	46
Soluciones nutritivas	50
Descripción del experimento.....	51
Etapa I. Calibración de la curva de retención de humedad " <i>In situ</i> ".....	51
II Etapa. Tratamientos.	55
Equipos electrónicos utilizados.....	56
Programador (IngPlantae, Mod. 1.0).	59
Conexiones eléctricas, redes y registro de datos	60
Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) con registro de un sensor dieléctrico capacitiva (DECAGON, Mod. GS3), Tensiómetro Irrometer Modelo LT y un Pluviómetro ECRN-100.....	62
Diseño experimental	65
Variables de respuesta	66
Materia seca:	67

Rendimiento:.....	68
Análisis estadístico	68
Resultados	69
I. Curva “ <i>In situ</i> ”.....	69
II. Efectos de los tratamientos sobre el contenido de humedad (θ) en el sustrato.....	70
Eficiencia de uso del agua (EUA)	77
Presupuestos parciales.	78
Discusión.....	80
Conclusiones.....	86
Recomendaciones.....	87
Literatura citada.....	88
Anexos	107

Índice de cuadros

Cuadro 1. Temperaturas críticas para el cultivo de tomate (INIA, 2017).....	21
Cuadro 2. Características físicas de la fibra de coco 28,8 L utilizada como sustrato para el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero.....	47
Cuadro 3. Volumen de los diferentes tipos de agua descritos en la Fig. 4, según volumen de sustrato FICO® en el contenedor de 28,8L.	48
Cuadro 4. Concentración de elementos (ppm) utilizados en el experimento en cada etapa fenológica y el tiempo en semanas que estuvo utilizando.	51
Cuadro 5. Agua disponible (L, %) según FICO® en comparación con el potencial mátrico (kPa) según <i>curva “In situ”</i>	53
Cuadro 6. Agua disponible (mL y %) según FICO® en comparación con el potencial mátrico (kPa) según <i>curva “In situ”</i>	54

Cuadro 7. Potencial mátrico(kPa) y porcentajes de humedad volumétrica según porcentaje de agotamiento del agua disponible en el sustrato.....	69
Cuadro 8. Promedios de la θ (%v/v) en el sustrato al momento de iniciar los riegos en los diferentes tratamientos.....	71
Cuadro 9. Promedios de la θ (%v/v) antes de iniciar el protocolo de capacidad de campo en los diferentes tratamientos.....	71
Cuadro 10. Promedios de la θ (%v/v) en el protocolo de CC en los diferentes tratamientos.....	72
Cuadro 11. Contenido θ (% v/v) en el sustrato, según agotamiento (%), curva <i>in situ</i> y método de control de riego.	73
Cuadro 12. Promedios de las desviaciones estándar (DE) de la θ (%v/v) según tratamiento	73
Cuadro 13. Promedio de la θ (%v/v) del ciclo según el agotamiento (%) y el método de control.....	74
Cuadro 14. Promedio del rendimiento calidad 1 (kg m ²) obtenido durante el ciclo según el tratamiento.....	74
Cuadro 15. Rendimiento promedio de frutos de calidad 2 (kg m ²)	75
Cuadro 16. Promedios del desecho (kg m ⁻²) obtenido durante el ciclo según cada tratamiento.	76
Cuadro 17. Promedios del peso seco (kg m ²) obtenido durante el ciclo según el tratamiento.	76
Cuadro 18. Uso eficiente del agua comercial establecido como kg de producto comercial obtenido por m ³ de agua según cada tratamiento.(EUA _c ,kg m ⁻³).....	77
Cuadro 19. Promedio del uso eficiente del agua total (EUA _T kg m ⁻³) obtenido durante el ciclo según cada tratamiento.....	78

Índice de figuras:

Figura 1. Ubicación del invernadero en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Fuente: Google Maps.	44
Figura 2. Vista interior (a) y exterior (b) del invernadero tipo semiarco multicapilla utilizado para el experimento.....	44
Figura 3. Valores máximos, promedios y mínimos de temperatura (°C), humedad volumétrica (%) y radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) total (mmol/m ²) obtenida dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo.....	45
Figura 4. Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco, respectivamente generada por FICO®.	48
Figura 5. Gutación debido al excedente de agua en el sustrato, además de un color morado el raquis de la hoja, relacionado a problemas fisiológicos.	49
Figura 6. Ajuste bivariante de la θ (% v/v) en función del potencial mátrico (kPa), generada por la curva "In situ", $R^2=0.992$	52
Figura 7. Ajuste bivariante entre potencial mátrico (kPa) y el agua disponible (%). Se muestra la ecuación de ajuste: $Y=-0.0765x+10$ con un $R^2 = 1$	53
Figura 8. Ajuste bivariante entre θ (% v/v) y el Agua disponible (%). Se muestra la Ecuación de ajuste: $Y=-0.0034x^2-0.052x+32.2$ con un $R^2 = 1$	55
Figura 9. Tensiómetro utilizado (sin el manómetro) (a) y dispositivo de salida de voltaje (b). (Irrrometer, 2018a).....	56
Figura 10. Sonda capacitiva dieléctrica utilizada en el experimento (DECAGON DEVICES mod. GS3).	57
Figura 11. Pluviómetro ECRN-100 utilizado en el experimento para medir volúmenes de drenaje.	58
Figura 12. Registrador de datos (Campbell Scientific mod. CR1000) utilizado para registro y control de datos en el experimento.....	58

Figura 13. (a) Instalación de Controlador de riegos horarios, (b) relés de control ensamblados, (c) Arduino e interior del controlador. Diseño y programación por el Ing. Francisco Rivas y el Ing. Carlos Huertas Blanco.	59
Figura 14. Equipos, instalación y diseño utilizados en el riego con temporizador, tratamientos TRH. Elaborado por el técnico Julio Vega.	60
Figura 15. Equipo, diseño y distribución eléctrica de cada dispositivo utilizado en los tratamientos con riego por bandeja de demanda CDI y TRH. Elaborado por técnico Julio Vega.	61
Figura 16. Controlador y registrador de datos (CR1000) y conexiones e instalación del cableado eléctrico, cada cable representa una conexión con cada una de las parcelas de investigación de forma independiente.	62
Figura 17. Algoritmo de control para el funcionamiento de la canaleta de demanda inteligente (CDI). Diseñado por el Ing. Agr. Carlos Huertas y adaptado al lenguaje de programación por Julio Vega.	63
Figura 18. Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) en un cultivo de tomate bajo invernadero.	64
Figura 19. Estructura de soporte de los tensiómetros (a) instalados en el contenedor de fibra de coco (b) que fue colocado en la CDI con cultivo. (Estructura diseñada por Julio Vega).....	65
Figura 20. Ilustración del diseño experimental, mostrando los 6 tratamientos por tres repeticiones (diferentes colores). Las "X" de color azul muestran el borde a dejar en la parcela, las "X" de color negro simbolizan las plantas. Para efecto descriptivo GS3 corresponde a los tratamientos TRH y CDI a los de la canaleta de demanda inteligente. Las UE de cada tratamiento se agrupan según el color: anaranjado (CDI ₁₀), azul (CDI ₂₀), verde (CDI ₃₀), amarillo (TRH ₁₀), gris (TRH ₂₀) y rojo (THR ₁₀).....	66
Figura 21. Croquis descriptivo de la forma que se hará el muestreo destructivo, la X roja indica la planta que será destruida según el día después de trasplante, el doble cuadro interior negro indica donde estará ubicada el TRH y la CDI. ..	68

Figura 22. Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en el sustrato de fibra de coco, utilizado en el experimento. 70

Figura 23. Costos variables generados por el experimento. Se muestran los rubros de Programación y mantenimiento según la CDI y TRH, así como su costo en colones costarricenses. 79

Resumen

Las investigaciones en el desarrollo de tecnologías aumentan, con el fin de obtener más producción con menor cantidad de agua e insumos agropecuarios, gracias a la formación de equipos interdisciplinarios entre agronomía y áreas de tecnología se están desarrollando diferentes dispositivos para determinar el cuánto y cuándo regar con mejor ajuste a la demandas hídricas de los cultivos y puntos donde el cultivo se estimule a producir más; sin embargo, existe una necesidad en el país de desarrollar metodologías que permitan validar los dispositivos que se generen a nivel nacional con los que se importan, con el fin de mejorar futuras versiones o adaptarlos a condiciones del trópico. El objetivo de la presente investigación fue validar una versión generada en el país de la Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) como método de control de riego, en comparación con riegos horarios (TRH) como la metodología más utilizada en el país para programar los riegos; determinando el efecto y la interacción de los métodos de control a 3 diferentes agotamientos (%). Para esto se cultivó tomate en invernadero bajo un sistema hidropónico; se utilizaron 6 tratamientos combinando los dos métodos de control con 3 niveles de agotamientos (10%, 20% y 30%), estos cuenta con 3 repeticiones que se distribuyen en un diseño irrestricto al azar con un arreglo factorial de 3 x 2. Las variables de respuesta fueron: la humedad volumétrica (% v/v) dividida en: promedio donde iniciaron los riegos, promedio a capacidad de campo (CC), promedio antes de iniciar el protocolo CC, promedio de las desviaciones estándar diarias, promedio de la humedad volumétrica diaria, el rendimiento en términos de calidad primera, segunda y desecho, así como el uso eficiente del agua (EUA). Se evaluó además el costo variable por medio de la metodología presupuestos parciales, determinado el valor económico de la hora trabajadas en programación y en mantenimiento de los diferentes equipos de control. Se encontró que el efecto CDI_{30} y CDI_{20} fueron los que generan mayor respuesta en términos de rendimiento, variabilidad, exactitud al iniciar los riegos y promedios diarios de humedad volumétrica. Los que presentaron menor producción fueron los TRH en mayor variabilidad en el control. En general el método de control CDI fue el que mejor respuesta generó y los tratamientos con 30% y 20% fueron

mejores que tratamientos con 10% de agotamiento. Los CDI tienen mayor costo en el mantenimiento y los TRH generaron mayor inversión en la reprogramación de tiempos de riego.

Introducción

En el mundo existe un aproximado de 800 millones de personas que viven con escasez de agua y alimento; es preocupante como a lo largo de la historia nunca ha existido tanto déficit de este recurso (Espinoza *et al.* 2003); por lo cual, las mejoras en cuanto al mejor uso del recurso hídrico es la clave para mejorar su calidad de vida. Gracias a los avances de la tecnología, el hombre ha podido evolucionar en sus ideas de mejoras y prácticas agrícolas, en el riego propiamente que responden a esta necesidad (Anderson *et al.* 2005; Turner y Asseng, 2005).

En la búsqueda del uso eficiente del agua (EUA), que se refiere a riegos más controlados y adecuados a las necesidades del cultivo, busca producir más con menos agua, ya que en la actualidad este recurso se está volviendo limitado (Bramley, Turner, y Siddique, 2013).

El factor de búsqueda presente en esta investigación, se asocia directamente con los cambios climáticos sufridos en los últimos años propiamente en Costa Rica; el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) desde 1999 expone como los incrementos en la temperatura, con variaciones en la precipitación, lo que produce una disminución en los rendimientos de los cultivos; siendo la temperatura el elemento que mayor peso tiene, sumado al aumento en las precipitaciones (Bouroncle *et al.* 2015; Flores *et al.* 1999). Precisamente estos cambios en los patrones de lluvia significará que se distribuyan de manera diferente las zonas aptas para los cultivos, afectando a muchos cantones que tienen la agricultura como base de su economía (Bouroncle *et al.* 2015).

Esta problemática existe no solo a nivel nacional, sino en todo el mundo, razón por la cual el uso de la hidroponía y nuevas tecnologías para controlar la frecuencia y cantidad de agua aplicada son beneficiosas (Bastida, 2012; Beltrano y Gimenez, 2015, 2015; Eckstein, Künzel, y Schäfer, 2018; Soto, 2018).

Ante esta problemática, la hidroponía con un sistema de riego controlado de forma automática es una de las respuestas más asertivas. El éxito del sistema de la producción hidropónica depende en gran medida de un adecuado control

de riego encontrando formas más eficientes de usar el agua, buscando producir más con menos cantidad de recursos.

En manejo del riego el definir ¿cuándo y cuánto regar? siempre ha sido una de las principales interrogantes para investigadores y productores. Tradicionalmente se manejan diferentes metodologías: 1) programación de riego por tiempos fijos; la más utilizada en a nivel de país (Díaz *et al.* 2004, Marín 2007, Monge-Pérez 2014, Salazar 2013,), 2) métodos basados en la medida del estado hídrico del sustrato, 3) basados en parámetros climáticos, 4) mediante el estado hídrico de la planta (Gallardo 2005, Soto, 2018).

Sin embargo, la mayoría de estos métodos son utilizados en investigación, ya que los dispositivos de control son muy costosos (Soto 2016, Gallardo 2005). Actualmente en Costa Rica existe poca información sobre cuáles son los beneficios de cada una de las metodologías anteriormente expuestas; y el método de riego por tiempos fijos presenta problemas ya que se ha comprobado que es el que menos determina las necesidades hídricas del cultivo (Gallardo 2005).

Para estimar Evapotranspiración del cultivo (ET_c) se han propuesto métodos empíricos, que estiman el agua evaporada y transpirada por unidad de superficie de cultivo, los cuales son diversos en complejidad, precisión y requerimientos de datos. Por otra parte, existen métodos directos para estimar la ET_c que permiten validar con precisión los métodos empíricos (Martínez y Bart 2011, Sánchez-Martínez 2000, Sánchez 2001, Cisneros 2003).

Con base en lo anterior, en el año 2013 se planteó el diseño de una Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) con software de control, con el apoyo de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), de la Universidad de Costa Rica.

La CDI basa su funcionamiento en sensores que monitorean el estado hídrico del sustrato y el volumen de drenaje en tiempo real. Los datos son almacenados en un registrador de datos que mediante algoritmos activa cuándo regar y ajusta cuánto volumen regar.

Mediante la CDI, la planta indirectamente activa el sistema de riego para abastecer su demanda hídrica, en respuesta a las condiciones climáticas, al tamaño del cultivo y al estado hídrico del sustrato, en un momento dado.

Esta investigación nace por la evidente necesidad de generar una metodología para validar diferentes dispositivos para controlar riegos de forma automática, tanto dispositivos nacionales como internacionales sobre controles automáticos de riego (Rodríguez-Ortega *et al.* 2016, Ortega 2015, Viani 2016, Lugo Espinosa *et al.* 2011)

Objetivos

Objetivo general

- Validar la capacidad de la Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) como dispositivo para controlar el riego en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en comparación con el método controlado por riegos horarios (TRH) asistidos por sensores dieléctricos capacitores GS3 de DECAGON calibrados para fibra de coco en fusión con la canaleta de drenaje, en términos de rendimiento, control de humedad del sustrato y bajo indicadores económicos.

Objetivos específicos

- Determinar la precisión y exactitud los controladores por medio la variabilidad de la humedad volumétrica (θ) del sustrato y el error estadístico fuera del rango programado según su porcentaje de agotamiento.
- Determinar el nivel productivo en términos de la eficiencia de uso del agua (kg de 0tomate/m³), rendimiento acumulado (cosecha) y peso seco para cada sistema de riego.
- Determinar el valor económico de las dos metodologías por medio de la metodología conjunta Power BI y balance generales (presupuestos parciales) al final del proyecto.

Revisión de literatura

El cultivo de tomate

Importancia mundial

El tomate junto al cultivo de la papa, representan aproximadamente 50% de la producción de hortalizas a nivel mundial (Barrón Pérez *et al.* 2002; Bastida, 2012). El consumo per cápita promedio mundial presenta una tendencia a incrementar. De acuerdo con la FAO, pasó de 15.4 kilogramos en 2001 a 20.2 kilogramos en 2011, el consumo mundial de tomate creció a una tasa promedio anual de 3.9 por ciento (FIRA, 2016).

En China pasó de 16,4 a 30,2 kg en un periodo de 10 años, mientras que en India incrementó de 6,2 a 12,0 kg. El crecimiento del consumo en Estados Unidos ha sido más moderado; entre 2001 y 2011 creció a una tasa promedio anual de 1,1 por ciento, en tanto que el consumo per cápita se ha mantenido estable con un promedio de 41,0 kg durante ese período (FIRA, 2016).

Importancia nacional

El tomate es la principal hortaliza en consumo a nivel nacional, con 18,6 kg por persona; se estiman 1000 productores en su mayoría pequeños y medianos, que producen durante todo el año, generando empleos e ingresos de forma permanente (López y MAG 2017). Esta producción se ubica en 6 regiones: Región Central Occidental (provincias de Alajuela y Heredia) con aproximadamente 585 ha (60,9%), Región Central Oriental (provincia de Cartago) reportan 125 ha (13%), Región Central Sur (Puriscal, Santa Ana y San Antonio de Belén) con 101 ha (10,5%), Región Brunca (Pérez Zeledón, Buenos Aires, San Vito), Región Pacífico Central (Orotina y Miramar) y Región Chorotega (Bagaces, Nicoya, Abangares, Liberia, La Cruz y Tilarán) cada una con 50 ha (5,2%), lo que corresponde a un aproximado de 961 ha sembradas en todo el país. (López y MAG 2017).

El costo de producción de una hectárea de tomate se estima en 10 millones de colones, con una producción total a campo abierto de 48 ton ha⁻¹ y bajo ambiente protegido superior a los 150 ton ha⁻¹. De esta actividad se producen anualmente alrededor de 50.000 toneladas/año lo que genera un ingreso de ₡10,000.000.000 diez mil millones de colones en el año. (López y MAG 2017).

Requerimientos climáticos del Tomate

Aunque se produce en diferentes condiciones de clima y suelo, el tomate se produce mejor en climas secos con temperaturas moderadas, sin embargo, existen nuevas variedades que permite su cultivo en condiciones adversas.

El tomate es una especie de estación cálida, su temperatura óptima de desarrollo varía entre 18 y 30°C. Las temperaturas extremas pueden ocasionar diversos trastornos, ya sea en la maduración, precocidad o color, mientras que temperaturas bajo 10°C afectan la formación de flores, problemas en el desarrollo de la planta y frutos, provocando deformidades y temperaturas mayores a 35°C pueden afectar la fructificación (INIA, 2017).

En el Cuadro 1 se describen varias temperaturas, sin embargo, es importante considerar que los valores de temperaturas por sí solos son referenciales, ya que repercute mayormente su interacción con otros factores. Por ejemplo, la combinación de altas temperaturas con humedad baja puede generar aborto floral y baja viabilidad del polen (INIA, 2017).

Cuadro 1. Temperaturas críticas para el cultivo de tomate (INIA, 2017)

Estado	Temperatura
Congelación de la planta	-2°C
Detiene su desarrollo	10-12°C
Desarrollo normal de la planta	18-25°C
Mayor desarrollo de la planta	21-24°C
Germinación óptima	25-30°C
Temperaturas óptimas	
Desarrollo	Diurna 23-26°C
	Nocturna 13-16°C
Floración	Diurna 23-26°C
	Nocturna 15-18°C
Maduración	15-22°C

El crecimiento y desarrollo del tomate comprende de 3 a 5 etapas, las cuales tienen una duración diferente dependiendo del ambiente, la variedad, las técnicas de producción y del hábito de crecimiento (determinado o indeterminado). En igualdad de condiciones lo normal es que la duración de cada etapa sea mayor en las variedades indeterminadas.

Las etapas de germinación, crecimiento, floración y fructificación se dan mejor bajo un ritmo alternante de temperatura entre el día y la noche, que a una temperatura constante (Bastida, 2012; Maroto, 2002). Estas etapas pueden verse alteradas por la exigencia de la planta a la radiación solar; cuando se desarrolla en épocas o condiciones de baja radiación el ciclo vegetativo se prolonga significativamente, la planta se alarga y el tallo es delgado. En hojas cuando se combinan baja radiación con temperatura altas, la planta llega a presentar hasta 18 hojas antes del primer racimo (Castro, 1992). En cuanto al

tallo, cuando la cantidad de luz es igual o mayor al óptimo no afecta su desarrollo, pero para valores por debajo del óptimo el tallo se enlonga, siendo estos muy delgados y débiles con una mayor proporción de tejido parenquimático (Kinet, 1977).

Pero, más allá del crecimiento vegetativo de la planta, el tomate requiere al menos 6 horas diarias de luz directa para florecer (Bastida, 2012; INIA, 2017).

Otro factor que puede alterar la producción es la humedad relativa, la ideal oscila alrededor de 50 a 60%; cuando es más alta las anteras se humedecen y el polen no puede liberarse para ser depositado en el estigma, por lo que no hay formación de fruto (Bastida, 2012). Por el contrario, cuando el ambiente es muy seco los órganos masculinos y femeninos de la flor se deshidratan impidiendo la fecundación (Nuez, 1995).

Si el ambiente de producción es bajo invernadero, la humedad relativa ideal es de 60% a 70%; los excesos se pueden controlar con ventilación, aumentando la temperatura. En el caso de la falta de humedad relativa se controla con nebulización de agua (Rodríguez *et al.* 1997).

Factores que impulsan al uso de la hidroponía

La problemática nacional del agua y el cambio climático

En términos de la variabilidad y el cambio climático, Costa Rica ocupó en el 2012 el puesto 72 entre los países más vulnerables en el Índice de Riesgo Climático Global, determinado en gran medida por su nivel de exposición y vulnerabilidad a eventos extremos. En el 2018 sigue manteniéndose entre los 100 países con mayor riesgo y vulnerabilidad (Eckstein *et al.* 2018).

Por otra parte, según IMN (1999) se presentan incrementos en la temperatura, con variaciones en la precipitación, produciendo una disminución en los rendimientos de los cultivos. El elemento que mayor peso tiene en este efecto es la temperatura, aunque el efecto aislado de aumentos en la

precipitación diaria tiende a aumentar los rendimientos; cuando se combina con incrementos de 1 y 2°C en la temperatura, los rendimientos disminuyen.

Históricamente no ha existido tanto déficit en la disponibilidad de agua, sin embargo existe una preocupación en el aumento en el deterioro de la calidad del agua superficial en las cuencas que abastecen las plantas potabilizadoras, causada por prácticas agropecuarias inapropiadas y por un desarrollo urbano mal planificado (Espinoza *et al.* 2003).

Según el Ministerio de Salud existen factores de presión sobre las fuentes de agua, los procesos de cambio en el uso de la tierra (deforestación, drenaje de humedales e impermeabilización por desarrollo urbano y descarga de desechos que potencialmente pueden alcanzar los niveles freáticos) y los patrones de consumo, las tasas de extracción de aguas subterráneas resulta insuficiente (Espinoza *et al.* 2003).

Se prevé que las zonas del país donde se verán las mayores consecuencias y tipos de fenómenos serán: inundaciones en el Pacífico Central (Zona de Quepos, Parrita), la Zona Caribe (cantón de Matina, Limón), y Turrialba). Frentes fríos que afectan el Valle Oriental, la Zona Norte y Caribe con períodos lluviosos entre noviembre y marzo. Tormentas con mayor afectación en el Pacífico Norte y Central. Aumento de la temperatura, y sequías prolongadas en el Trópico Seco de Guanacaste y la Zona Norte territorios que tienden a ser los más afectados por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), lugares donde el gobierno deberá hacer grandes inversiones en distribuir, drenar y cuidar el agua de maneras más eficientes (Gamedá *et al.* 2014).

Esta problemática existe no solo a nivel nacional, sino en todo el mundo, razón por la cual el uso de la hidroponía y nuevas tecnologías para controlar la frecuencia y cantidad de láminas de riego son beneficiosas (Bastida, 2012; Beltrano y Gimenez, 2015, 2015; Eckstein *et al.* 2018; Soto, 2018).

Hidroponía

La palabra hidroponía se origina del griego: *hydro* (agua) y *ponos* (trabajo), es decir, “trabajo en agua”. Se define como la técnica del cultivo sin

suelo, donde las plantas se riegan con una mezcla de minerales, microorganismos benéficos, bio-estimulantes (solución nutritiva). En esta técnica, el suelo como medio de cultivo se sustituye por ciertos sustratos inertes y estériles, estables física y químicamente, o en algunos casos por la misma solución nutritiva como es el caso del NFT (Nutrient Film Technique) (Ahmed *et al.* 2016; Bastida, 2012; Beltrano y Gimenez, 2015).

La adecuada implementación de esta técnica posee ventajas importantes para los productores, ya que es posible obtener una mejor producción respecto a cultivar en suelo. A su vez presenta inconvenientes y es primordial una correcta capacitación técnica (Bastida, 2012; Vargas, 2010).

Ventajas del uso de la hidroponía

Dentro de las ventajas principales del uso de la hidroponía se pueden resaltar (Bastida, 2012; Beltrano y Gimenez, 2015).:

1. Es la opción más adecuada para cultivar cuando existen limitaciones respecto al suelo, agua y clima. Cuando el suelo no es adecuado para la agricultura por ser poco productivo o que haya escases de este debido a la erosión.
2. Se aprovecha mejor el agua por medio de un sistema de riego cerrado, con medios de purificación y recirculación. También en lugares donde llueve poco es posible controlar la frecuencia y la cantidad de riego buscando el no estresar hídricamente el cultivo.
3. La integración entre invernaderos e hidroponía ofrece la posibilidad de controlar muchos de los factores que influyen en el desarrollo de los cultivos, esto nos permite obtener productos de calidad superior a los cultivados a campo abierto.
4. Dentro de estos factores por controlar cabe mencionar la nutrición; es posible conocer en cantidades de hasta partes por millón de las concentraciones de nutrientes que se aportan a la planta.
5. También ejercer control son el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva y de los drenajes.

Conjuntando todas las ventajas anteriores se pueden obtener mayores rendimientos por unidad de superficie que en campo abierto, siempre y cuando los cuidados al cultivo sean los adecuados.

Es necesario mencionar que parte del éxito de los sistemas hidropónicos proviene de una adecuada atención a cualquier detalle del cultivo, lo cual significa saber manejar cada inconveniente de manera rápida y efectiva.

Desventajas

Dentro de las desventajas prevalecen (Bastida, 2012; Beltrano y Giménez, 2015):

1. El propósito de la hidroponía es evitar que los cultivos se estresen por condiciones bióticas y abióticas. La atención en todo momento a cultivos en hidroponía es crucial, pues un ligero cambio hará que sufran desbalances nutrimentales o alteraciones severas puede afectar el abastecimiento de oxígeno y agua.
2. En este sistema la programación de los tiempos de riego debe ser precisa, la solución nutritiva se debe mantener siempre balanceada de acuerdo con las necesidades de las plantas, y este balance varía de un día para otro.
3. La inversión económica inicial es alta,. Es necesario instalar bombas, llaves de paso, tuberías, filtros, contenedores, sustrato, reservorios, entre otros.

Eficiencia de uso de agua (EUA)

El agua y la seguridad alimentaria están estrechamente relacionadas. Aproximadamente 800 millones de personas en el mundo pasan hambre y la mayoría de ellos viven con escasez de agua, por ende la posibilidad de aumentar la EUA a través de medios genéticos y agronómicos ha recibido mucha atención (Araus *et al.* 2018; FAO, 2002; Passioura y Angus, 2010; Reynolds y Tuberosa, 2008).

La agricultura de conservación, la gestión mejorada del riego y otras prácticas agronómicas han contribuido significativamente a mejorar los rendimientos en condiciones limitadas de agua (Anderson *et al.* 2005; Turner y

Asseng, 2005), sin embargo, para seguir esta tendencia aún es necesario desarrollar genotipos que se adapten mejor a sus entornos (Bramley *et al.* 2013).

La EUA describe el compromiso intrínseco entre la fijación de carbono y la evapotranspiración (ET_c); esta última es generalmente baja, ya que se pierde mayor cantidad de agua que las unidades equivalentes de carbono fijado por la fotosíntesis, las plantas típicamente transpiran 200 – 1.000 g de agua por g de carbono asimilado (Bramley *et al.* 2013; Martin J. H. y Leonard, 1949).

La EUA se usa a nivel de cultivo en campo, como la proporción de biomasa o rendimiento económico con respecto a la ET_c (Bramley *et al.* 2013):

$$EUA\ b = \text{biomasa foliar} / ET_c$$

$$EUA\ g = \text{rendimiento} / ET_c$$

Ecuación 1 y 2

La ET_c debe medirse durante toda la temporada de crecimiento del cultivo. En experimentos en invernaderos donde se pueden pesar macetas y extraer raíces, dicha eficiencia pueden basarse en la biomasa total (Bt) (Bramley *et al.* 2013).

$$EUA\ t = Bt / ET_c$$

Ecuación 3

Uno de los problemas asociados con la medición de EUA en el campo es la pérdida de agua por evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, de modo que los cambios en EUA pueden reflejar cambios en la evaporación del suelo en lugar de cambios en la evapotranspiración de plantas. En macetas es posible cubrir el suelo o medio de cultivo para reducir la evaporación del suelo, por lo que el EUA es cercana a la ET_c . (Bramley *et al.* 2013).

Antecedentes de la Eficiencia de Uso del Agua

Se ha comprobado que la aplicación de tecnologías para el EUA es fundamental para una producción eficiente y sostenible, previniendo las consecuencias del cambio climático y la alta demanda de agua por parte de la agricultura (Martinez-Guzman y FAO, 2013).

Se estima que en los próximos 20 años la producción agrícola aumentará en proporción al aumento de población. Aunque se estima que en los países en desarrollo aumenten las importaciones de alimentos, la mayor parte de la demanda será satisfecha por producción local (FAO, 2002).

Los aumentos en la demanda de alimentos pueden ser cubiertos, elevando la productividad agrícola, aumentando la superficie cultivable e incrementando la intensidad de cultivo (número de cultivos por año). Se estima que el 69% del aumento de la producción debe proceder del incremento de la productividad; el 12% del aumento de la intensidad de cultivo y el resto de la superficie cultivable (FAO, 2002).

En los próximos años la eficiencia de los sistemas de riego puede incrementarse de un promedio del 38% o alrededor del 42%. Estudios de la FAO realizado en 93 países en desarrollo muestra que la extracción de agua para la agricultura fue aproximadamente 2128 km³. Si la EUA puede aumentarse hasta un 42%, se calcula que en 2030 será necesario utilizar solamente 2420 km³ de agua para regar una superficie neta cultivada algo más de un tercio superior a la actual (FAO, 2002).

En cuanto a la EUA propiamente en el cultivo de tomate, hay muchos procesos hidráulicos y bioquímicos involucrados en el control del flujo de agua a través de la planta y la fotosíntesis. Existen muchos genes y su interacción determina la EUA de una planta durante el desarrollo y bajo estrés hídrico, sin embargo, esta se debe principalmente a las propiedades hidráulicas, como la conductancia estomática y la anatomía de la vía de transporte de agua, o factores que regulan esas propiedades, como la densidad estomática que en las plantas C₃, la mayor limitación es la RuBisCO, que ofrece pocas posibilidades de mejora a nivel genético (Bramley *et al.* 2013; Kulkarni y Deshpande, 2006; Sade *et al.* 2010, 2009; A. J. Thompson *et al.* 2007).

Muchos resultados indican que la principal forma de mejorar la EUA de los cultivos agrícolas será a través de una reducción en el uso del agua en lugar de aumentos en la eficiencia fotosintética, además, se ha observado que una mayor ET_c se debe generalmente a menores tasas de transpiración (Blum, 2005, 2009; Bramley *et al.* 2013).

Control automático de fertirriego

Definición de controlador automático

Un controlador automático es un dispositivo electrónico con memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones, con las cuales se ejecutan funciones específicas para fiscalizar procesos (Rivas, 2017).

Dentro de los tipos de funciones programables se describen las secuenciales, lógicas, temporales, sincrónicas, aritméticas, entre otras. Regularmente cuenta con terminales de entradas digitales y analógicas, en donde se conectan señales de estímulo exterior y terminales de salida, las cuales se dirigen a un conjunto de herramientas disponibles para ejecutar acciones de control (Rivas, 2017).

Antecedentes de los controles automáticos inteligentes

Como se ha mencionado, el EUA se ha vuelto una prioridad a nivel mundial, fomentando el desarrollo de tecnologías cada vez más eficientes, comparando metodologías y a su vez rediseñando, adaptando y ajustando dispositivos y demás herramientas en los sistemas de producción de alimentos (FAO, 2006).

En la actualidad se han incorporado a estos avances, las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que han permitido en la agricultura intensiva, elaborar con mayor precisión la gestión del riego (López *et al.* 2011, Prasad *et al.* 2012).

La implementación por parte de Mohammad *et al.* (2013) de un sistema de manejo inteligente del riego basado en la predicción de la ET_c mediante el monitoreo de parámetros meteorológicos en tiempo real en los cultivos de

tomate, bajo condiciones mediterráneas, ha logrado incrementar la eficiencia del uso del agua en los cultivos, aumentando así la producción.

Por otra parte, Rodríguez-Ortega *et al.* 2016 determinaron que los aumentos de la temperatura tienen un efecto negativo sobre el crecimiento y rendimiento del tomate, y observaron que al optimizar la gestión del agua en tomate de invernadero con riegos más frecuentes y un sistema inteligente de control, se obtienen mejores resultados agronómicos.

El Departamento de Nutrición Vegetal del CEBAS-CSIC, Murcia, generó un sistema de riego inteligente denominado "HortiControl Expert", capaz de gestionar el riego de forma automática y sencilla basándose en el monitoreo en tiempo real de la radiación solar, el volumen de riego y la conductividad eléctrica de la solución de drenaje; además permite que el agua de riego se suministre de acuerdo con las necesidades de las plantas, por lo que es muy útil para evaluar con precisión las respuestas agronómicas de los cultivos a diferentes regímenes de riego (Rodríguez-Ortega *et al.* 2016). El principal potencial, se enfatiza en la necesidad de saber cómo las plantas tendrán que ser manejadas en un ambiente de alta temperatura, y bajo el probable escenario de cambio climático, para mantener la productividad de los cultivos y la seguridad alimentaria en los próximos años (Anwar *et al.* 2013).

Respecto a los antecedentes anteriores, la única similitud con el dispositivo a evaluar es el software de autocorrección de riego, ya que todos los dispositivos expuestos muestran alguna variante en cuanto a hardware o algoritmo de control.

A nivel nacional solo existe una referencia de un método de control directo: la canaleta de demanda implementada por Calvo y Ramírez (2008), donde se concluyó que la canaleta fue más rentable por la eficiencia de aplicación de agua y nutrientes, generando un 91% de lechugas aprovechables contra un 71% alcanzado con el método indirecto. Este dispositivo no cuenta con sistema inteligente (autocorrección) y presenta correcciones por parte de los autores, propiamente en el hardware, además de que recomiendan realizar pruebas en otros cultivos. Sin embargo, los autores no mostraron metodología de diseño ni análisis estadístico; por lo que se justifica aún más la necesidad de la validación

y de hacer estudios en control de riego inteligente en el país bajo métodos científico.

Herramientas que se pueden utilizar en controladores automáticos para determinar la frecuencia de riego

Tensiómetros

A medida que el suelo se seca las partículas retienen el agua con mayor fuerza; los tensiómetros miden esa fuerza con la que el suelo retiene el agua. Estos tienen una punta de cerámica porosa conectada a una columna de agua destilada con algún tipo de alguicida, estos se instalan a la profundidad donde las raíces toman el agua del suelo. A medida que el suelo se seca, comienza a conducir el agua de la columna de agua a través del bulbo de cerámica, provocando succión en la columna del líquido dentro del instrumento. Esta fuerza se mide con un indicador de succión. Los dispositivos electrónicos usualmente son más sensibles que los indicadores de aguja (Martin y Muñoz, 2017).

Los tensiómetros funcionan bien en los suelos con alta capacidad de retención, pero tienden a perder buen contacto cuando el suelo se encuentra muy seco o cavitando la columna de líquido dentro del instrumento. El costo de este instrumento varía entre \$30 por un tensiómetro de tamaño pequeño con medidores de aguja, hasta \$2000 por los medidores electrónicos con capacidad de toma de lecturas en múltiples sitios (Martin y Munoz, 2017).

Tensiómetros en sustratos

A pesar de la disponibilidad de sensores de humedad del suelo como tensiómetros (Buttaro *et al.* 2015; Krüger *et al.* 1999; Van Der Veken, Michels *et al.* 1982) estos tienen problemas al adaptarlos a sustratos o suelos con estructuras físicas gruesas o arenosas. Uno de los cuidados importantes es que un área importante de la superficie del sensor puede estar en contacto con el aire, esto podría provocar la cavitación dentro del tensiómetro, causando mediciones erróneas y poco confiables. Otro factor importante a considerar es la estructura para sostener el tensiómetro firmemente en un sustrato; de no existir esa estructura el sensor se desplaza fácilmente, lo que puede causar una

pérdida de contacto entre la punta cerámica y el sustrato, provocando cavitación (Nemali *et al.* 2007).

En la actualidad se han adaptado tensiómetros específicos para sustratos contemplando bajas succiones y estructuras pequeñas. El Modelo LT y MLT de IRROMETER (Baja Potencial mátrico en Miniatura) fue diseñado para uso en pequeños volúmenes de sustrato. Tienen escalas de 0 - 40 kPa, la punta de cerámica es de color azul; diseñada para aplicaciones de bajo potencial mátrico en las que se necesita una respuesta rápida a las variaciones de humedad en suelos muy gruesos o en sustrato (Irrrometer, 2018b).

Estudios en este tipo sensores en condiciones han logrado reducir hasta un 50-73% en el uso de agua en comparación con diferentes testigos (Muñoz-Carpena *et al.* 2005), e instalados de la manera correcta ha demostrado ser eficiente en control y registro de humedad en los sustratos y realizar diferentes estudios para mejor la producción del tomate (Colla *et al.* 2014; Fanasca *et al.* 2006; Rouphael *et al.* 2004).

Sondas capacitivas dieléctricas

Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es dependiente de cada material. Por ejemplo, el aire tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 1, mientras que la mayoría de los materiales del suelo, tales como: la arena, arcilla y material orgánico, poseen una constante dieléctrica entre 2 y 4. El agua por su parte, tiene la característica de que cuenta con una constante dieléctrica muy alta en comparación con los demás compuestos presentes en el medio de crecimiento de la raíz; su constante dieléctrica 78 (Rivas, 2017).

Por lo anterior, al medir la magnitud de la constante dieléctrica en una porción representativa del sustrato, la sonda capacitiva estima el contenido de humedad integrando todas las constantes y generando una relación: a mayor porcentaje de agua por unidad de volumen, mayor constante dieléctrica (Rivas, 2017).

Sensor dieléctrico GS3

El (METER, antiguamente Decagon Devices, mod. GS3, es un sensor dieléctrico que ayuda a registrar humedad, temperatura y conductividad eléctrica (CE).

El circuito interno y diseño se han optimizado para uso en sustratos o suelos con estructuras similares, brinda un rango amplio de medición de la CE y un rango mayor de temperatura.

Las agujas, al ser de acero, no solo mejoran el contacto con el sensor, sino que también mejoran la capacidad de este para medir la CE en sustratos porosos como la turba o la perlita. Estos sensores minimizan el efecto de la salinidad y la textura del sustrato utilizando una frecuencia de 70 MHz (METER, 2018a, 2018b).

En varios estudios se han utilizado estos sensores junto con otras herramientas para correlacionar el estrés hídrico y el estado fisiológico del tomate en sustratos, buscando mejorar la producción (Henderson *et al.* 2018; Litvin *et al.* 2016). Los GS3 ayudan a identificar tendencias o cambios relevantes en salinidad, contenido de agua y la distribución de los bulbos húmedos en sistemas de riego automatizados (Bonachela *et al.* 2018; Henderson *et al.* 2018).

Por otra parte, se han encontrado varios estudios donde se examina el uso de sensores de capacitancia para automatizar y ensamblar en controladores automáticos inteligentes de riego en cultivos hortícolas (Bayer *et al.* 2013; Burnett y Iersel, 2008; Nemali y Iersel, 2008; Thompson *et al.* 2007b)

Calibración de sondas dieléctricas

Para interpretar correctamente las mediciones del sensor capacitivo, se requiere una calibración adecuada para sustratos específicos (van Iersel, 2013; Nemali *et al.* 2007). Aunque la mayoría de los fabricantes de sensores proporcionan coeficientes de calibración para sustratos, la variedad de estos

medios de cultivo, dificultan la creación de una calibración común para la mayoría de estos (Rhie y Kim, 2017)..

Una ecuación de calibración global para el sustrato podría no proporcionar una interpretación confiable de las lecturas de los sensores para sustratos como mezclas de perlita o fibra de coco. La calibración incorrecta puede llevar a una mala interpretación de datos valiosos, lo que a su vez da como resultado información errónea sobre las respuestas de las plantas bajo un cierto nivel de humedad del sustrato (Rhie y Kim, 2017).

Sin embargo, también existen estudios donde se han evaluado las variaciones de los GS3 generando conclusiones contrarias a lo anterior. Precisamente uno de estos estudios consistió en medir el porcentaje de θ de dos tipos de sustrato, en dos puntos de contenido: una con la muestra seca y otra después de agregar agua uniformemente al sustrato hasta que se produzca drenaje, dejando reposar el recipiente durante 5 minutos. Como resultado de esta prueba se mostró que ninguno de los sensores produce mediciones significativamente diferentes de las demás. cuando se inserta en una muestra de sustrato seco o húmedo (Henderson *et al.* 2018).

Ante todo lo expuesto anteriormente, METER (2018) genera una ecuación de calibración genérica que funciona para todos los tipos sustrato, con una precisión superior a $\pm 5\% \theta$ (%V/V), donde ε_a es la salida estándar calibrada de fábrica del GS3 antes de aplicar una calibración, la ecuación a utilizar es (METER, 2018a):

$$\theta \% = 0.118\sqrt{\varepsilon_a} - 0.117$$

Ecuación 4

Humedad y parámetros para el manejo del agua en tomate

El tomate es una planta que tiene relativamente pocas exigencias en cuanto a la humedad del suelo, principalmente por la concordancia estructural entre el sistema radical que absorbe agua con facilidad, y el sistema foliar que

gasta agua con dificultad. Una deficiencia de humedad provoca reducción del crecimiento, reduce la etapa de crecimiento y el periodo funcional de las hojas (Bastida, 2012; Resh, 2001).

La floración-fructificación-cosecha es la etapa que presenta mayor sensibilidad a condiciones de estrés hídrico, influyendo directamente sobre el rendimiento y la calidad (Chen *et al.* 2013; Kuşçu *et al.* 2014). La etapa de crecimiento vegetativo es relativamente corta, con un incremento continuo de biomasa vegetativa que se estabiliza hasta que inicia el crecimiento de frutos; la etapa productiva es más larga y coinciden simultáneamente ciclos de crecimiento vegetativo, floración, formación y crecimiento de frutos (Gallardo *et al.* 2011; Kuşçu *et al.* 2014; Soto, 2018).

Los parámetros más estudiados para controlar la humedad en los sustratos son temperatura, conductividad eléctrica, concentración de oxígeno y θ o sus respectivas equivalencias. Además, los umbrales de potencial mátrico y contenido volumétrico de agua son usados para programar el volumen y frecuencia de riego, responden el cuándo y cuánto regar. La mayoría han sido descritos como intervalo de riego, porcentaje de agotamiento permisible, punto de relleno, umbrales de riego, límite superior e inferior de riego, entre otros (Ali, 2010; M. W. V. Iersel, Dove, Kang, y Burnett, 2010; Incrocci *et al.* 2014; Pardossi y Incrocci, 2011; Pardossi *et al.* 2009; Soto, 2018; R. B. Thompson, Gallardo, Valdez, y Fernández, 2007a; R. B. Thompson *et al.* 2007b; Westhuizen y Jacoba, 2009)

La relación entre contenido volumétrico del agua y el potencial matricial, nos permite determinar el rango de humedad en la que el agua está fácilmente disponible para el cultivo (Vence *et al.* 2013). Conocer lo anterior determina el porcentaje de agotamiento, cuando se logra mantener en el rango donde no genere estrés hídrico en la planta, y un reporte en incrementos de 42% en la eficiencia de uso de agua sin afectar el rendimiento y la calidad de frutos (Gallardo *et al.* 2011; Kuşçu *et al.* 2014). Por otra parte, el manejo con excesos de humedad causa amarillamiento en el follaje, aborto de flores y frutos, así como incidencia de enfermedades. (Gardner *et al.* 1990; Maroto, 2002).

El tipo de sustrato, su granulometría y la forma del contenedor, podrían afectar el uso de umbrales de humedad para el manejo del riego, influyendo control, el volumen y la frecuencia de riego, por ejemplo, estudios determinaron que a mayor altura del contenedor, menor volumen de agua disponible y tipos de materiales, como turba de sphagnum (peat moss) que requirió riegos cortos y más frecuentes que la grava (Arguedas-Rodríguez *et al.* 2006). Por tanto, es fundamental determinar las características físicas del sustrato, ya que hay una alta variabilidad según su origen y composición (Abad *et al.* 2002). También dependen de diferentes factores tales como el genotipo, el clima, manejo agronómico y la técnica de cultivo, entre otros (Soto, 2018).

Por otra parte, el límite superior, donde el sustrato deja de drenar es llamado capacidad de contenedor (CC) y corresponde al punto máximo de contenido volumétrico de agua, a partir de ese punto hay un exceso de agua, llegando a saturar el sustrato y generando problemas fisiológicos en las plantas. El límite inferior es el valor mínimo a partir del cual el cultivo entra en estrés hídrico, lo que indica cuándo regar; el punto más bajo es llamado punto de marchitez permanente (PMP) donde la planta ya no se recuperará (Soto, 2018)..

El intervalo entre los límites superior e inferior determina el volumen de riego y es automatizado gracias al control del riego en tiempo real mediante parámetros establecidos por diferentes dispositivos y sensores (Ali, 2010; M. W. V. Iersel *et al.* 2010; Incrocci *et al.* 2014; Pardossi y Incrocci, 2011; Pardossi *et al.* 2009; Soto, 2018; R. B. Thompson *et al.* 2007a, 2007b; Westhuizen y Jacoba, 2009). Algunos estudios han demostrado que el estrés hídrico a nivel de planta puede alcanzarse mucho antes de conseguir un determinado nivel de agotamiento de la lámina de agua por ende es importante determinar el punto ideal (Soto, 2018; R. B. Thompson *et al.* 2007a, 2007b).

Calibración *In situ*: Potencial mátrico y humedad volumétrica (θ)

Como se ha mencionado, existe una relación directa entre el potencial mátrico del sustrato y la cantidad de agua disponible para la planta en un

volumen determinado de sustrato. Gracias a esta relación se puede determinar a qué presión el sustrato retiene una determinada cantidad de agua.

Soto, (2018); y Thompson *et al.* (2007a), describen una forma de determinar esta relación junto con un cultivo: se trata de una calibración *In situ*. Se refiere a llevar el sustrato a saturación, esperar a que deje de drenar y al observar una estabilidad, se obtiene el punto de capacidad de contenedor (CC). Una vez obtenido ese punto, se siembra algún cultivo y este por medio de la evapotranspiración, irá secando el sustrato hasta llevarlo a punto marchitez permanente (PMP), situación que se va monitoreado por variables fisiológicas.

Ahora es de conectar tantos sensores capacitivos dieléctricos, contadores de drenaje y tensiómetros, a registradores de datos electrónicos para el registro en tiempo real, por lo que permite generar toda la curva de datos desde CC hasta PMP.

En investigaciones previas realizadas en la Estación experimental Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica, se ha estudiado que la calibración *In situ* es una de las mejores formas de determinar la θ de fibra de coco, ya que por medios gravimétricos ha sido difícil. El efecto más determinante ha sido que al secarse la fibra de coco se tiende a expandir y al mojarse se contrae, lo que hace que la densidad aparente esté cambiando constantemente, y por ende para pasar de humedad gravimétrica a humedad volumétrica necesitará más estudios y equipos para ser evaluada.

Frecuencia de riego

Riegos horarios

Es uno de los métodos más utilizados en Costa Rica (Marín, 2007), la frecuencia de los riegos es ajusta en función del tiempo, este que es determinado según la experiencia del agricultor. Este método requiere la intervención constante del usuario, quien lo reajusta de acuerdo a los procesos y estado fisiológico de la planta (Rivas, 2017).

Es estos casos su funcionalidad es limitada, ya que por muy ajustados y calculados que sean los tiempos de activación, al presentarse condiciones climáticamente atípicas, se puede ocasionar un exceso o déficit hídrico temporal para la plantación; a pesar de lo anterior, es necesario en fases iniciales del cultivo, ya que utilizar algún otro método de control de riego por demanda necesitará que las plantas estén establecidas y alcancen un estado de crecimiento donde las raíces estén en toda el área de monitoreo (Rivas, 2017).

Riegos por demanda

Son considerados herramientas de comunicación entre la planta y controlador, y permite que el cultivo sea el que defina cuándo se le debe aplicar un riego. Sin embargo, es indispensable en este tipo de sistemas establecer tiempos de retardo, márgenes de tolerancia e histéresis, que impidan al controlador responder ante estímulos instantáneos y que sea capaz de distinguir aquellas generadas por perturbaciones, frecuentes en un ambiente de producción agrícola (Rivas, 2017).

Dentro de los parámetros de demanda más comunes se encuentran:

Demanda por temperatura acumulada

Funciona integrando el valor instantáneo de la temperatura en el ambiente inmediato del cultivo, obteniendo así el valor acumulado de la temperatura en función del tiempo ($^{\circ}\text{C}/\text{hora}$).

Cuando se alcanza un umbral de temperatura acumulada que previamente es ingresado en forma de parámetro al controlador, se origina una orden de inicio de riego y el contador pone a cero su valor acumulado para iniciar un nuevo ciclo (Gallardo, 2005; Rivas, 2017).

Demanda por radiación acumulada

Funciona al obtener el valor instantáneo de la radiación global incidente, que por medio de un algoritmo de integración obtiene la suma total de radiación recibida por la planta en función del tiempo (en unidades de W/m²hora).

Al alcanzar un valor de umbral de radiación acumulada determinado por el usuario, se origina una orden de inicio del riego; con cada inicio se tiene que generar nuevo conteo (Gallardo, 2005; Rivas, 2017).

Demanda por humedad del suelo o sustrato

Son los que se instalan directamente en el sustrato o medio de cultivo que por diferentes métodos indican la cantidad agua disponible del medio: Tensiómetros, TDR, Sondas capacitivas dieléctricas (GS3). Gracias a un porcentaje de agotamiento determinado por el usuario, se genera cierto límite de humedad donde el controlador da la orden de activación de riego (Rivas, 2017)..

Demanda por nivel

Es uno de los sistemas más utilizados en España (Gallardo, 2005). Aquí por medio de electrodos se detecta un descenso del nivel en un depósito de demanda, la zona radicular de la planta absorbe el líquido del depósito gracias a una tela de alta porosidad (fieltro o pana), conocida como “manta absorbente” y su comportamiento responde al fenómeno físico de capilaridad .

La manta se instala sobre un recipiente diseñado y conocido como “bandeja de demanda”. La diferencia de altura de los electrodos es quien define la frecuencia de activación del riego, cuando el agua desciende y deja de tocar los electrodos interrumpe la señal eléctrica entre ellos (Rivas, 2017).

Volumen de riego

Las necesidades de riego de un cultivo son definidas por el riego consumido durante la evapotranspiración y sus requerimientos de lixiviación. Estos consisten en la cantidad de agua aportada durante el riego que es destinada a evitar la acumulación de sales en el entorno radicular, evitando

también un porcentaje de drenaje excesivo que genere problema de saturación o desperdicio de agua y fertilizantes (Rivas, 2017).

Por su parte la evapotranspiración (ET) se define como la combinación de dos procesos, uno por los que el agua se agota a través de la superficie del suelo: debido a la evaporación ocasionada por el intercambio energético entre la superficie del suelo o sustrato y el ambiente, y segundo mediante la transpiración del cultivo generado por la vaporización de líquido a través de los tejidos de la planta, predominantemente por las estomas (FAO, 2006). Como ya se ha mencionado en casos donde el sustrato está protegido de la temperatura y radiación ambiental prácticamente la evaporación es mínima (Bramley *et al.* 2013; FAO, 2006)

Medición de la ET por balance de agua

Una de las formas de medir la evapotranspiración es por medio de un balance de agua en el medio de cultivo. Este evalúa los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo, en un periodo de tiempo establecido (FAO, 2006; Soto, 2018).

El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES) y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. (FAO, 2006).

El agua se puede transportar hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Cuando no hay pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden ser despreciados (FAO, 2006; Soto, 2018).

La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo

de un periodo de tiempo usando la ecuación descrita por FAO, (2006) y Soto, (2018).

Algunos flujos como el subsuperficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática, son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días. La ecuación para determinar el ET según este método es:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

Ecuación 5

Para sustrato se descarta P, por estar en invernadero, ΔFS , ES, C, también se descarta por el sustrato estar en un recipiente que lo aísla de estas fuerzas, por ende para una situación así descrita el cálculo de la ET según Soto, (2018) es:

$$ET = R - D \pm \Delta SW$$

Ecuación 6

Lisímetros

Los lisímetros son recipientes aislados, llenados con el mismo terreno o sustrato en los que el cultivo crece y se desarrolla. En este se miden los procesos de filtración y cada uno de los términos considerados en el balance hídrico de la ecuaciones anteriores (FAO, 2006; Rivas, 2017).

Existen dos tipos lisímetro: el lisímetro de drenaje, en el cual la ET es calculada a partir de la diferencia entre cantidad de líquido drenado, recogido del fondo del instrumento y la cantidad de agua que ingresa por el efecto combinado del riego y la precipitación. (FAO, 2006; Rivas, 2017).

El segundo tipo de lisímetro es el que utiliza una balanza en el fondo del instrumento, con la que se calcula la pérdida de agua a partir del cambio de masa ocasionado por la ET del sistema (FAO, 2006; Rivas, 2017).

Control de drenaje

Las herramientas o sensores deben que permitir conocer el valor de las unidades volumétricas drenadas, para interpretarlo como un porcentaje del agua total aplicada durante el riego anterior o bien, durante la totalidad de los riegos aplicados a lo largo de todo un día (Rivas, 2017). Instrumentos son el pluviómetro, vaso de drenaje con electrodos de nivel o incluso medidas manuales con probetas. El objetivo es registrar el excedente de cada riego y el acumulado diario (Soto, 2018).

Algoritmo de control de drenaje

Cuando se cuenta alguno de los dos métodos de medición de drenaje escritos en las secciones anteriores, es posible utilizar técnicas para controlar el volumen de riego en función del drenaje de un cultivo. El objetivo es seguir un porcentaje de drenaje definido por el usuario (drenaje deseado), mediante correcciones del error calculado a partir del riego anterior o el acumulado diario (Rivas, 2017).

Canaleta de demanda Inteligente

La canaleta de demanda inteligente (CDI) integra dispositivos para medir frecuencia de riego (tensiómetros, por radiación, temperatura, niveles) con la que determina cuándo debe ser regado. Además, cuenta con un lisímetro, un dispositivo de conteo de drenaje y un algoritmo de control de drenaje con los determinan el cuánto hay que regar.

El objetivo principal de la canaleta es aplicar el volumen de agua determinado según porcentaje de agotamiento de humedad volumétrica en el sustrato, por medio de almacenaje y procesamiento de datos que se obtiene de los sensores instalados al ajustar un porcentaje de drenaje para que no haya en la medida de lo posible, excesos y faltantes de agua.

Cuando a la CDI se le ajusta un nuevo porcentaje de drenaje o un porcentaje de agotamiento determinado, el equipo deberá tener la capacidad de ajustar en un corto plazo la frecuencia de riego, junto con el porcentaje de drenaje reprogramado.

Valoración económica

El presupuesto parcial es un método utilizado para organizar los datos experimentales con el fin de obtener los costos y beneficios de tratamientos alternativos. La principal característica es que no incluye todos los costos de producción, sólo aquellos que son diferentes al comparar las prácticas usuales de producción que sigue el agricultor con las prácticas propuestas. El objetivo es que estos costos permitan diferenciar un tratamiento del otro (Camacho-Arce, 2017; CIMMYT, 1988; Horton, 1986; Reyes Hernández, 2002).

Para la adecuada elaboración de un presupuesto parcial es necesario aclarar que se debe emplear una unidad de medida común en las variables consideradas con el fin de estimar los costos de la inversión de manera uniforme (Camacho-Arce, 2017; CIMMYT, 1988).

Costos variables

Los costos variables son los que cambian de un tratamiento a otro y están relacionados con los insumos comprados (semilla, fertilizantes, insecticidas, agua para riego, etc.), la mano de obra requerida, la maquinaria y equipos, entre otros (Camacho-Arce, 2017; CIMMYT, 1988).

Programa Power Bi

Debido a que en esta investigación y producción agrícola se generan muchos datos y es necesario el análisis de los mismos para explicar y ajustar muchos procesos que determinan el éxito o no de un buen rendimiento, en 2015 junto a un economista Allan Quesada, se trabajó en mejorar las formas de

registrar, procesar y analizar datos en tiempo real gracias al concepto “internet de las cosas”.

El programa Power BI, es el conjunto de herramientas creada por Microsoft y de acceso gratuito para análisis de datos que pone el conocimiento al alcance de toda la organización. Este permite conexión a cientos de orígenes de datos, preparación de datos simplificada, generación de análisis e informes que luego se publican para provecho de la organización en la Web y en dispositivos móviles, y fue adaptado para el procesamiento de los datos registrados en esta investigación.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), ubicada en el Distrito San José de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N y 84° 16' W, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa, de 1940 mm, 22°C y 78%, respectivamente, Figura 1.

Se utilizó un invernadero multitúnel orientado de este-oeste, formado por 4 módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo (1,440 m²), alturas de 6,5 m al centro del túnel y de 5 m al canalón. El invernadero fue construido en hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente tricapa de 200 µm de espesor y malla de nylon anti-insectos en las paredes frontales y laterales.

Consta de un sistema de ventilación lateral (pasivo) combinado con el funcionamiento automatizado de ventanas cenitales según la velocidad de viento monitoreada con anemómetro (Fig. 2)



Figura 1. Ubicación del invernadero en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Fuente: Google Maps.

|



Figura 2. Vista interior (a) y exterior (b) del invernadero tipo semiarco multicapilla utilizado para el experimento.

Durante el experimento, se monitoreó la radiación solar global con un piranómetro (marca Campbell Scientific, modelo CS301), la temperatura y la humedad del aire (marca Campbell Scientific, modelo HC2S3) en el interior del invernadero, almacenados en un registrador de datos (marca Campbell Scientific, modelo CR1000). El promedio durante el ciclo de la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) total (mmol/m^2) fue de $8988 \text{ mmol}/\text{m}^2/\text{día}$, por su parte el promedio de la temperatura se mantuvo en $24 \text{ }^\circ\text{C}$, en promedios máximos de $32 \text{ }^\circ\text{C}$ y $24 \text{ }^\circ\text{C}$ con promedios mínimos, por su parte la humedad relativa (%) tuvo un promedio de 74% durante el experimento (Fig. 3)

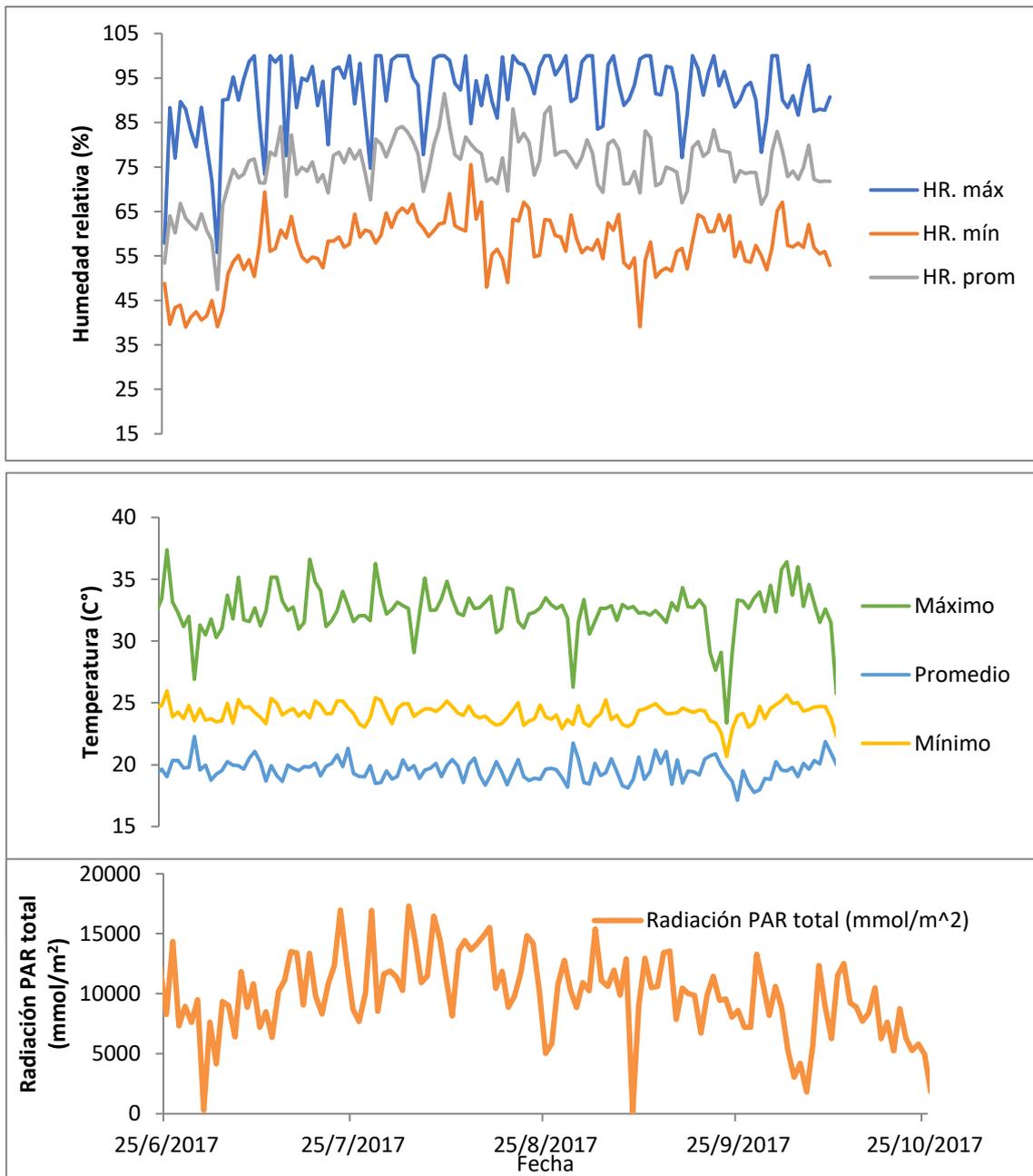


Figura 3. Valores máximos, promedios y mínimos de temperatura (°C), humedad volumétrica (%) y radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) total (mmol/m²) obtenida dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo.

Material vegetal

El cultivo utilizado para esta investigación fue el tomate variedad Gladiador F1 producida por Agrinova (Estados Unidos) y distribuida por Agro Verde en Costa Rica, según la ficha técnica de la empresa presenta las siguientes características:

- Planta con tolerancia media a virus de la cuchara (TYLCV), además de otras enfermedades.
- Planta con crecimiento indeterminado
- La fruta presenta alta firmeza.
- Calibre promedio de 300 a 350 gramos.

Generalidades y manejo agronómico del cultivo

El sustrato utilizado fue fibra de coco; el cual antes de iniciar con las evaluaciones, se determinaron sus características fisicoquímicas e hidráulicas mediante métodos de laboratorio recomendados para sustratos, esto por parte del fabricante FICO ®.

Las dimensiones de las tablas fueron de 0,18 x 0,16 x 0,1 m. La hidratación del sustrato se realizó en riegos cortos de 20 minutos hasta el punto de saturación, alcanzando un volumen de 28,8 L cada una. Se realizaron 6 cortes en forma de T invertida de en la base de la bolsa del sustrato y se permitió drenar el exceso. El Cuadro 2 muestra las características físicas de la fibra de coco utilizada.

Cuadro 2. Características físicas de la fibra de coco 28,8 L utilizada como sustrato para el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero.

Características físicas	Fibra de coco	% optimo
Partículas < 1 mm = índice de grosor (%)	65.35	--
Densidad aparente (gr cm ⁻³)	0.07	--
Densidad real (gr cm ⁻³)	0.65	--
Porosidad total (%)	90	> 85%
Partículas sólidas (%)	10	< 15%

Los componentes de agua y aire en la fibra de coco determinado por FICO[®], donde describe la curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco (Fig. 4)

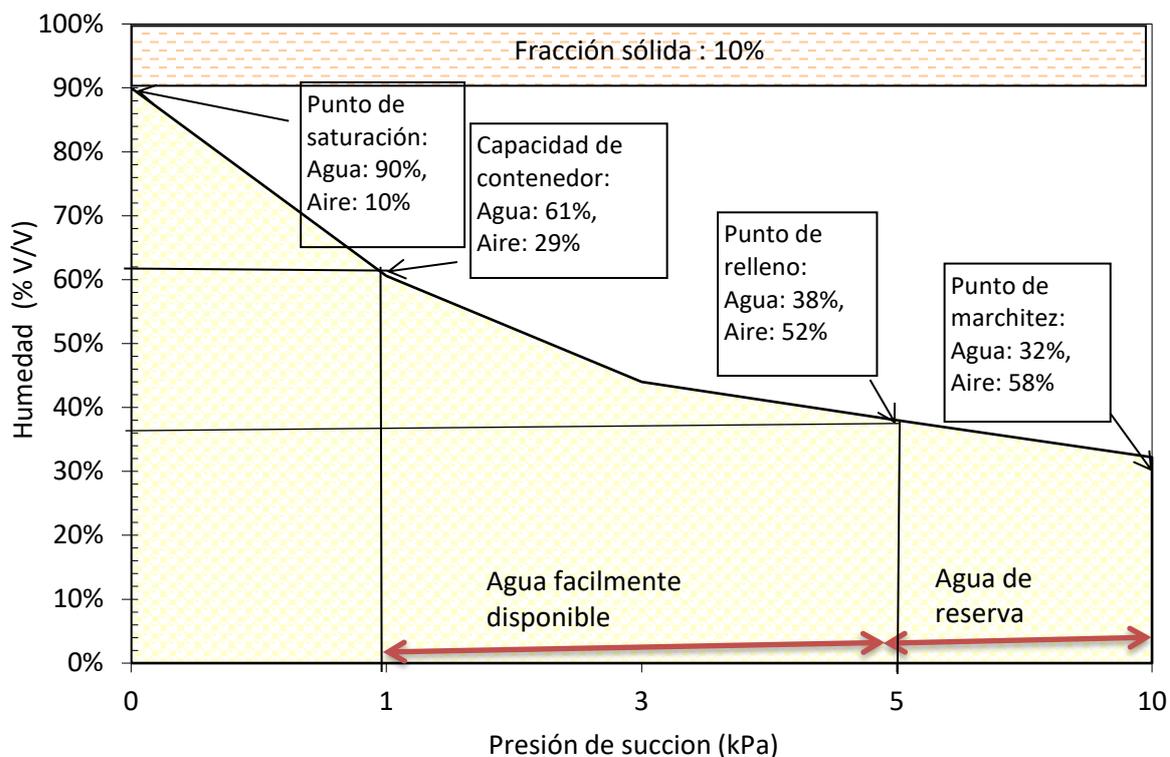


Figura 4. Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco, respectivamente generada por FICO®.

El Cuadro 3 muestra los tipos de agua disponible presentes en el sustrato de fibra de coco FICO®, donde existe 8.3 L de agua disponible sumando agua fácilmente disponible con agua de reserva en volumen de 28.8 L de sustrato .

Cuadro 3. Volumen de los diferentes tipos de agua descritos en la Fig. 4, según volumen de sustrato FICO® en el contenedor de 28,8L.

Tipos de agua.	Litros
Agua fácilmente disponible	6.6
Agua de reserva	1.7
Agua total disponible	8.3
Agua difícilmente disponible	9.3

Sin embargo, del día 40 a día 60 se empezó a observar una coloración morada y gutación por exceso de agua en el sustrato, por tal razón se determinó el punto de CC del sustrato “in situ” con las plantas (Fig. 5), se determinó que lo ideal para continuar con el experimento era determinar una nueva curva “*In situ*” con micro tensiómetros, sondas GS3 y los pluviómetros (descritos en equipos electrónicos utilizados) con la finalidad de construir una curva de liberación de agua del sustrato y así determinar volumen de agua realmente disponible para el cultivo, la metodología “*In situ*” será descrita más adelante.



Figura 5. Gutación debido al excedente de agua en el sustrato, además de un color morado el raquis de la hoja, relacionado a problemas fisiológicos.

La siembra se realizó por trasplante cuando las plántulas tuvieron aproximadamente 28 días de edad, con 4-5 hojas verdaderas. La distancia de siembra a utilizar fue de 33 cm, obteniendo una densidad 2 plantas por m².

El cultivo se llevó según las buenas prácticas agrícolas de la estación experimental llevando la misma fertilización, diseño hidráulico de riego, prácticas culturales y manejo integrado de problemas fitosanitarios.

Se utilizó un sistema de riego por goteo superficial independiente por tratamiento, que consta de tuberías de polietileno paralelas a las hileras de cultivo y provistas de goteros auto compensados y anti drenantes (2 L h^{-1}) a 4 goteros por tabla de cultivo.

El sistema hidráulico constó de 4 bombas (3 de $\frac{1}{2}$ HP y 1 de 1 HP) para asegurar la secuencia de riego dividiendo en número de tratamientos entre las bombas; con la posibilidad de encender cuatro tratamientos al mismo tiempo. La presión de operación se reguló con retrocesos en cada tratamiento.

El cultivo se formó a una sola guía por planta, con deshijas y podas semanales. En tutoradas con ganchos de descuelgue y guiadas con clips de en tutorado.

Soluciones nutritivas

La nutrición se aplicó mediante riego por goteo, utilizando soluciones nutritivas que estaban iónicamente equilibradas entre cationes y aniones. Los fertilizantes utilizados fueron el fosfato mono potásico, sulfato potásico, sulfato magnésico, nitrato cálcico, nitrato potásico y premezclas de micronutrientes, fueron mezcladas en soluciones madre 80 veces concentradas y diluidas con una mesa de inyección Sistema multi inyección AZUD QGROW BASIC (Azud, 2018) .

El pH de las soluciones nutritivas fue ajustado a 5,5 con ácido nítrico mediante un pHmetro digital con su respectiva calibración. Las concentraciones de nutrientes el pH y la CE del agua de riego fueron consideradas en el balance iónico de la solución nutritiva a utilizar en los ensayos, y fue la misma para todos los tratamientos.

Se utilizaron cuatro soluciones nutritivas en el manejo del cultivo en cuatro etapas fenológicas: establecimiento, desarrollo vegetativo, floración-inicio llenado fruto, llenado de fruto (Cuadro 4):

Cuadro 4. Concentración de elementos (ppm) utilizados en el experimento en cada etapa fenológica y el tiempo en semanas que estuvo utilizando.

Etapa Fenológica	Duración semanas	Elemento (ppm)											
		Ca	K	Mg	N	S	P	B	Mn	Fe	Cu	Zn	Mo
Establecimiento	2	124	156	32	110	52	40	0.5	0.8	1.1	0.2	0.2	0.09
Desarrollo Vegetativo	3	153	195	41	138	69	50	0.5	0.8	1.1	0.2	0.2	0.09
Floración-Inicio llenado fruto	4	162	242	53	152	99	44	0.5	0.8	1.1	0.2	0.2	0.09
Llenado de fruto (producción)	6	162	221	48	149	83	50	0.5	0.8	1.1	0.2	0.2	0.09

Descripción del experimento

El experimento se realizó en dos etapas. La primera etapa consistió en calibrar los sensores y generar las curvas de retención de humedad del sustrato *In situ* y la segunda la aplicación de tratamientos a partir de los 72 días después del trasplante (DDT).

Etapa I. Calibración de la curva de retención de humedad “*In situ*”.

Una vez establecido el cultivo y el sistema radical colonizó por completo el sustrato, a los 60 DDT, se instalaron 9 sondas GS3 y 4 tensiómetros en el contenedor con fibra de coco, para monitorear en tiempo real la humedad y el potencial mátrico del sustrato. Además, se instalaron 9 pluviómetros para medir el drenaje lixiviado. En el registrador de datos (Campbell, mod.CR1000) se almacenaban los datos generados por los sensores (descritos en apartado: Equipos electrónicos utilizados).

Para iniciar la curva “*In situ*” se inició riegos de 10 min con una frecuencia de 20 minutos para saturar el sustrato durante la noche. Con los datos de los pluviómetros se determinó la θ y el potencial mátrico en que cesó el drenaje. Posteriormente se dejó sin riego para que el cultivo extrajera el agua del sustrato por medio de la evapotranspiración hasta que se presentaron los primeros síntomas de marchitez. Después se realizaron riegos para volver a CC. Con los datos obtenidos se determinó “*In situ*” la curva de retención de humedad

del sustrato de fibra de coco. Con la curva “*In situ*” se generó un ajuste bivalente de la θ (% v/v) en función de la potencial mátrico (kPa), que generó la ecuación 7 (Fig. 6, R^2 : 0,99) para el ajuste polinomial de grado 5.

$$\begin{aligned} \theta \text{ (%v/v)} = & 82.430435 - 8.5446727 \times \text{Potencial mátrico (kPa)} \\ & + 2.0140605 \times (\text{Potencial mátrico (kPa)} - 3.15244)^2 + \\ & 1.1274344 \times (\text{Potencial mátrico (kPa)} - 3.15244)^3 - 0.829687 \times \\ & (\text{Potencial mátrico (kPa)} - 3.15244)^4 + 0.1184395 \times (\text{Potencial} \\ & \text{mátrico (kPa)} - 3.15244)^5 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 7}$$

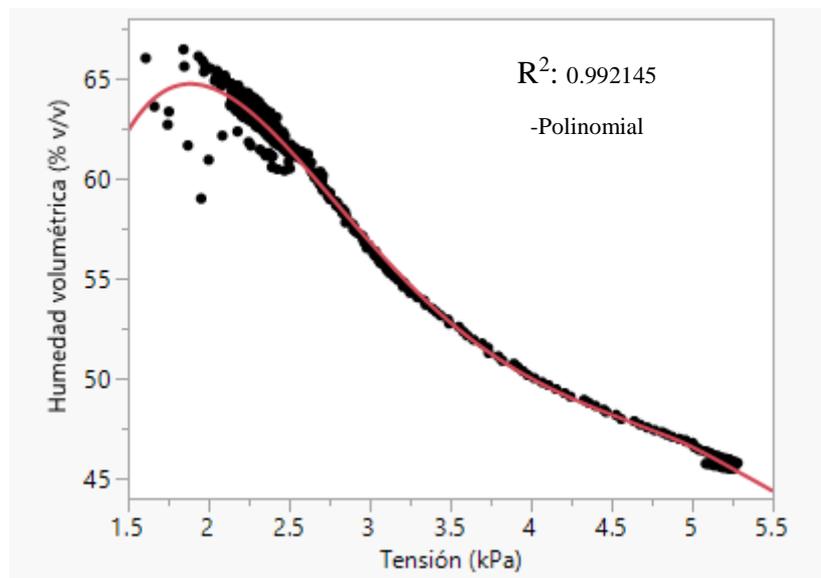


Figura 6. Ajuste bivalente de la θ (% v/v) en función del potencial mátrico (kPa), generada por la curva “*In situ*”, $R^2=0.992$.

Con el volumen de agua disponible determinada por FICO (Cuadro 3) y los datos de la curva “*In situ*” se obtuvo el punto de CC a 2,3 kPa correspondiente a un volumen de 8,3 L de agua disponible. FICO® estima el punto donde no existe agua disponible que corresponde a 10 kPa. Se hace la transformación en términos de porcentaje. El Cuadro 5 indica el agua disponible (L, %) según FICO® en comparación con la potencial mátrico (kPa) según la curva “*In situ*”:

Cuadro 5. Agua disponible (L, %) según FICO® en comparación con el potencial mátrico (kPa) según *curva "In situ"*.

Agua disponible (L)	Agua disponible (%)	Potencial mátrico (kPa)
8,3	100	2.3
0	0	10

Con base en los resultados del Cuadro 4 se realizó el ajuste bivariante entre potencial mátrico (kPa) y el agua disponible (%) para los dos puntos de referencia (Fig. 7, $R^2: 1$).

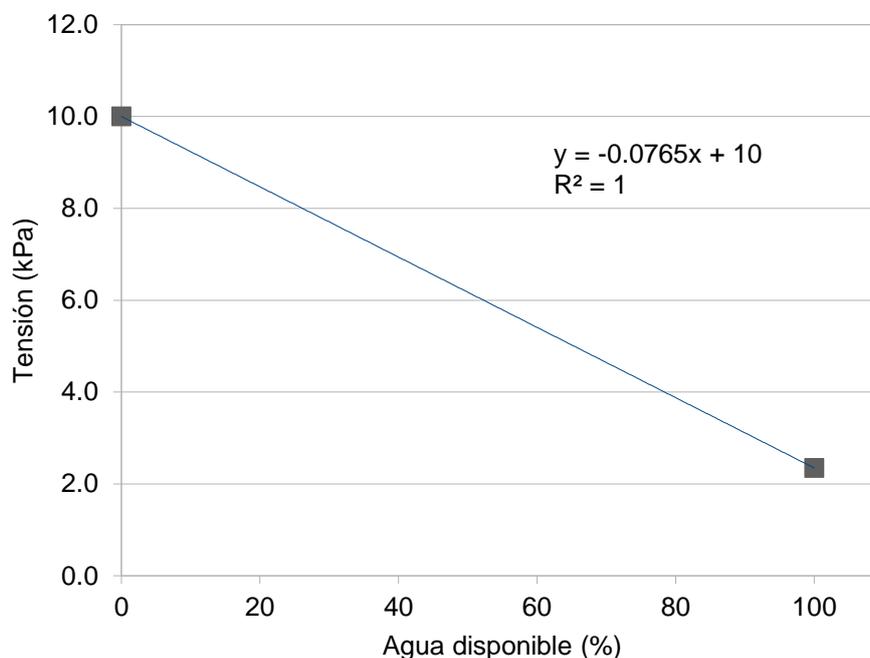


Figura 7. Ajuste bivariante entre potencial mátrico (kPa) y el agua disponible (%).

Se muestra la ecuación de ajuste: $Y = -0.0765x + 10$ con un $R^2 = 1$.

Con la ecuación $Y = -0.0765x + 10$ se obtienen todos los puntos del tensiómetro (kPa) en comparación con el agua disponible (%), donde Y = potencial mátrico (kPa) y x = agua disponible (%): Cuadro 6.

Cuadro 6. Agua disponible (mL y %) según FICO ® en comparación con la potencial mátrico (kPa) según curva “*In situ*”.

Agua disponible (mL)	Agua disponible (%)	Tensiómetro (kPa)
8300	100	2.3
7470	90	2.9
6640	80	3.3
5810	70	3.8
4980	60	4.4
4150	50	5.1
3320	40	5.9
2490	30	6.7
1660	20	7.7
830	10	8.8
0	0	10.0

También se realizó un ajuste bivalente θ (%) y se calculó el agua disponible (%) esto para obtener los datos de los porcentajes de agotamiento según FICO ®. en la Fig. 8. Se muestra la ecuación $Y = 0.0034X^2 - 0.052X + 32.2$ con un $R^2 = 1$.

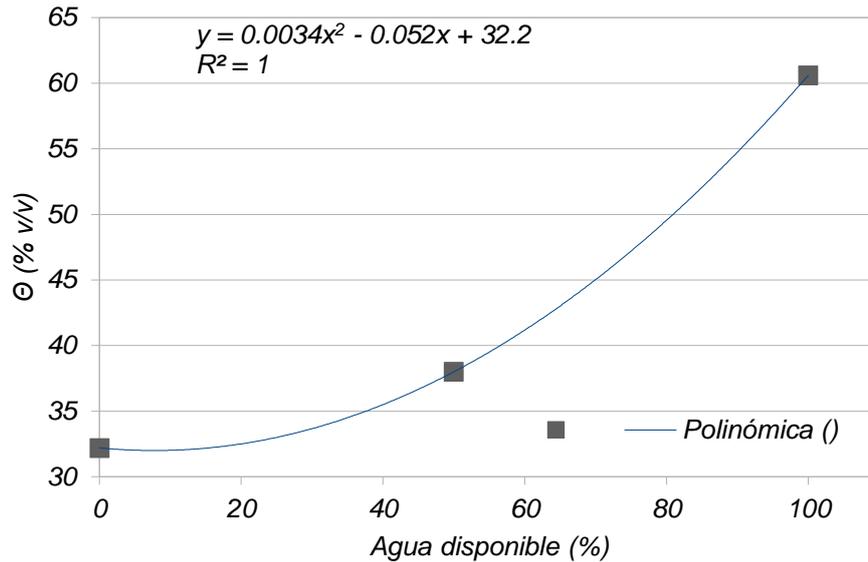


Figura 8. Ajuste bivariente entre θ (% v/v) y el Agua disponible (%). Se muestra la Ecuación de ajuste: $Y = -0.0034x^2 - 0.052x + 32.2$ con un $R^2 = 1$.

Finalmente, con todas las ecuaciones de ajuste bivariente se obtienen los diferentes puntos de θ (% v/v) agua disponible (mL y %), potencial mátrico (kPa) según la metodología, el tipo agua disponible y punto de agotamiento (%).

II Etapa. Tratamientos

Los tratamientos de riego se aplicaron manteniendo una gradiente de humedad según la curva de liberación de agua del sustrato, con diferentes porcentajes de agotamiento del agua total disponible determinados por la curva "In situ", estos puntos eran activados por dos tipos de controladores: canaleta de demanda Inteligente (CDI) y por riegos horarios (TRH).

Los porcentajes de agotamiento se definieron de la siguiente manera:

- 1) Riego manteniendo la humedad aproximada a la capacidad de contenedor (10 % de agotamiento).
- 2) Riego manteniendo la humedad en un punto intermedio entre CC y agua de reserva (20 % de agotamiento).

3) Riego manteniendo la humedad próxima al contenido de agua de reserva (30 % de agotamiento).

De esta forma se obtienen 6 tratamientos:

1. CDI con 10 % de agotamiento (CDI₁₀).
2. CDI con 20 % de agotamiento (CDI₂₀).
3. CDI con 30% de agotamiento (CDI₃₀).
4. TRH con 10 % de agotamiento (TRH₁₀).
5. TRH con 20 % de agotamiento (TRH₂₀).
6. TRH con 30% de agotamiento (TRH₃₀).

Equipos electrónicos utilizados

Se utilizaron Tensiómetros (IRRROMETER Mod.LT), de 30 cm de longitud (Fig. 9a), acoplados la opción de salida de voltaje Irrrometer “RSU-V (Fig. 9b), el cual mide potencial mátrico. La salida de voltaje puede ser fácilmente leído por la mayoría de las marcas de registradores de datos (Irrrometer, 2018a).

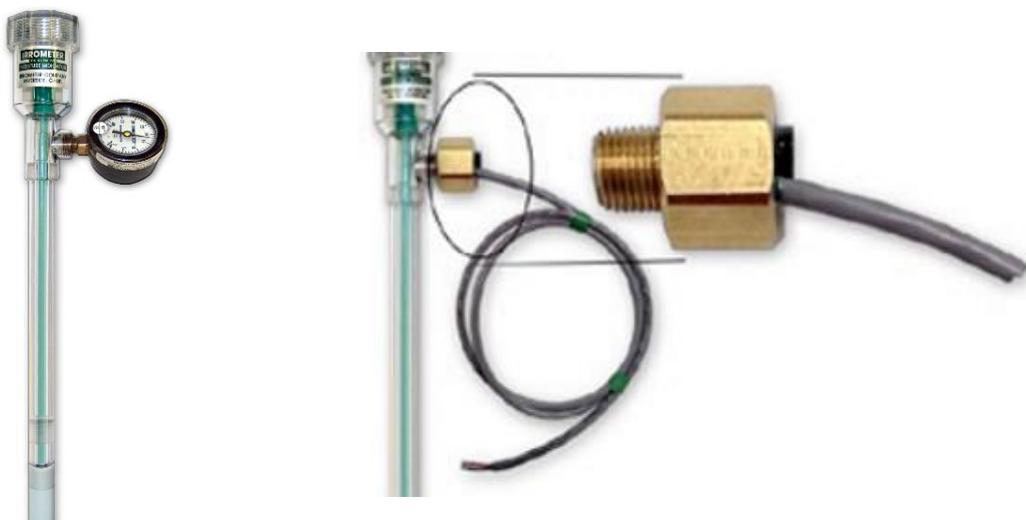


Figura 9. Tensiómetro utilizado (sin el manómetro) (a) y dispositivo de salida de voltaje (b). (Irrrometer, 2018a)

También se instalaron sensores dieléctricos capacitivos GS3 de Decagon, Figura 10, donde se midió el contenido de agua, la temperatura y la conductividad eléctrica (EC) de forma independiente.

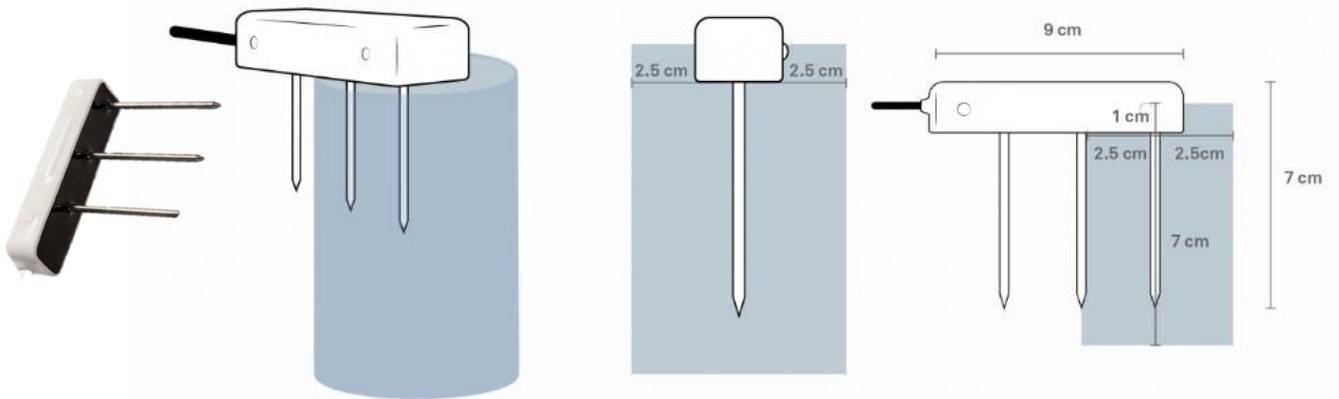


Figura 10. Sonda capacitiva dieléctrica utilizada en el experimento (DECAGON DEVICES mod. GS3).

El GS3 fue calibrado con la ecuación de calibración de fabricación, que recomienda METER para todo tipo sustrato, con una precisión superior a $\pm 5\%$ de θ (% v/v) ϵ_a es la salida estándar calibrada de fábrica del GS3 antes de aplicar una calibración, la ecuación a utilizar es (METER, 2018a):

$$\%HV = 0.118\sqrt{\epsilon_a} - 0.117$$

Ecuación 4

Se utilizaron pluviómetros de precisión (ICT internacional mod. ECRN-100), para medir volúmenes de drenaje con una resolución de 0.2 mm (0.01 in); superficie del colector 200 q / cm. (Fig. 11).



Figura 11. Pluviómetro ECRN-100 utilizado en el experimento para medir volúmenes de drenaje.

Todos los datos monitoreados con los equipos descritos anteriormente fueron almacenados en tiempo real en un registrador de datos (Campbell Scientific, mod. CR1000) (Fig. 12). Este se utilizó como controlador programable, el cual ofrece una funcionalidad en control y es compatible con una amplia gama de sistemas de comunicaciones, periféricos de expansión y software (Campbell Scientific, 2018):



Figura 12. Registrador de datos (Campbell Scientific mod. CR1000) utilizado para registro y control de datos en el experimento.

Programador (IngPlantae, Mod. 1.0)

Se utilizó para programar el riego por tiempo (IngPlatae mod. 1.0) diseñado por el Ing. Francisco Rivas y el Ing. Carlos Huertas Blanco, (Fig. 13).

Este permite controlar por medio de un Arduino de manera independiente todos los sectores, si fuera necesario iniciar los riegos de forma conjunta, encender las bombas al mismo tiempo. Este mecanismo es fundamental para el desarrollo del experimento, ya que la activación de las válvulas fuera en secuencia, en un caso hipotético donde existiera una demanda de riego de nueve sectores al mismo tiempo, habría una diferencia (dependiendo de cantidad de minutos de riego) de hasta dos horas, donde un sector tiene que esperar que termine los anteriores para que este sea regado.



Figura 13. (a) Instalación de Controlador de riegos horarios, (b) relés de control ensamblados, (c) Arduino e interior del controlador. Diseño y programación por el Ing. Francisco Rivas y el Ing. Carlos Huertas Blanco.

Este equipo controlaba dos bombas y nueve válvulas y permite la programación desde una PC, este se encargaba de controlar tratamientos por riegos horarios (TRH) (Fig. 14).

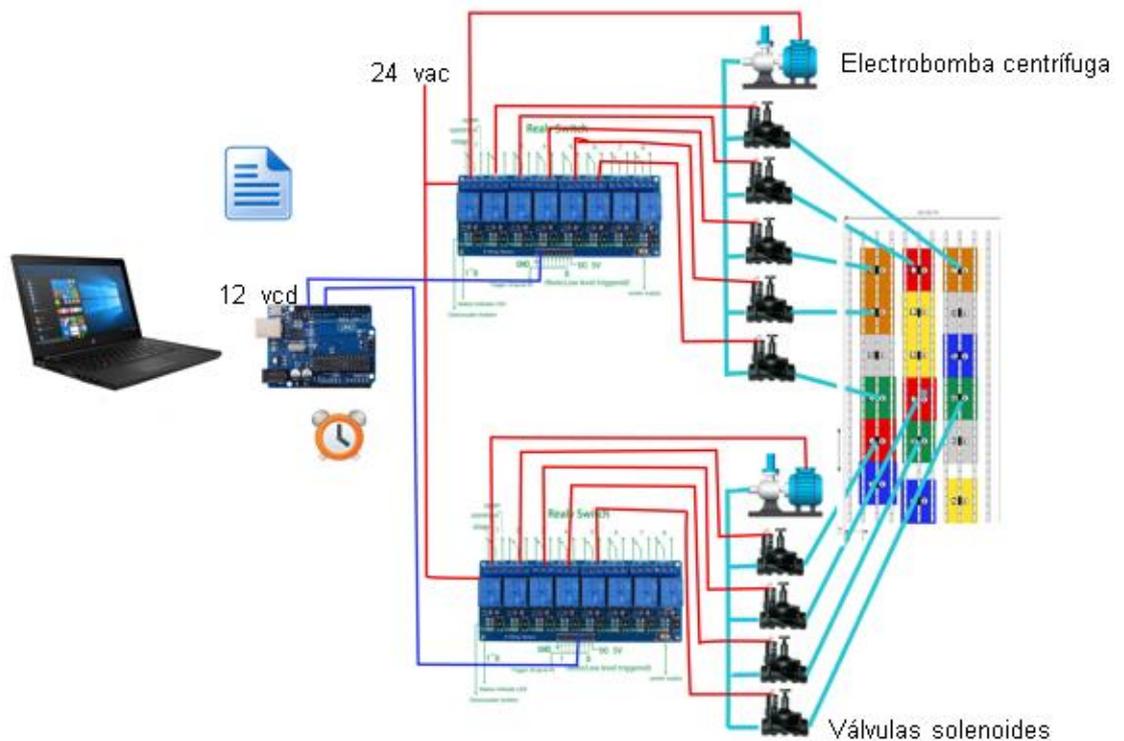


Figura 14. Equipos, instalación y diseño utilizados en el riego con temporizador, tratamientos TRH. Elaborado por el técnico Julio Vega.

Conexiones eléctricas, redes y registro de datos

Los datos almacenados en el registrador de datos eran procesados mediante un algoritmo que controlaba la CDI, las bombas de impulsión y las válvulas correspondientes a las 9 unidades experimentales correspondientes a los tratamientos CDI (Fig. 15).

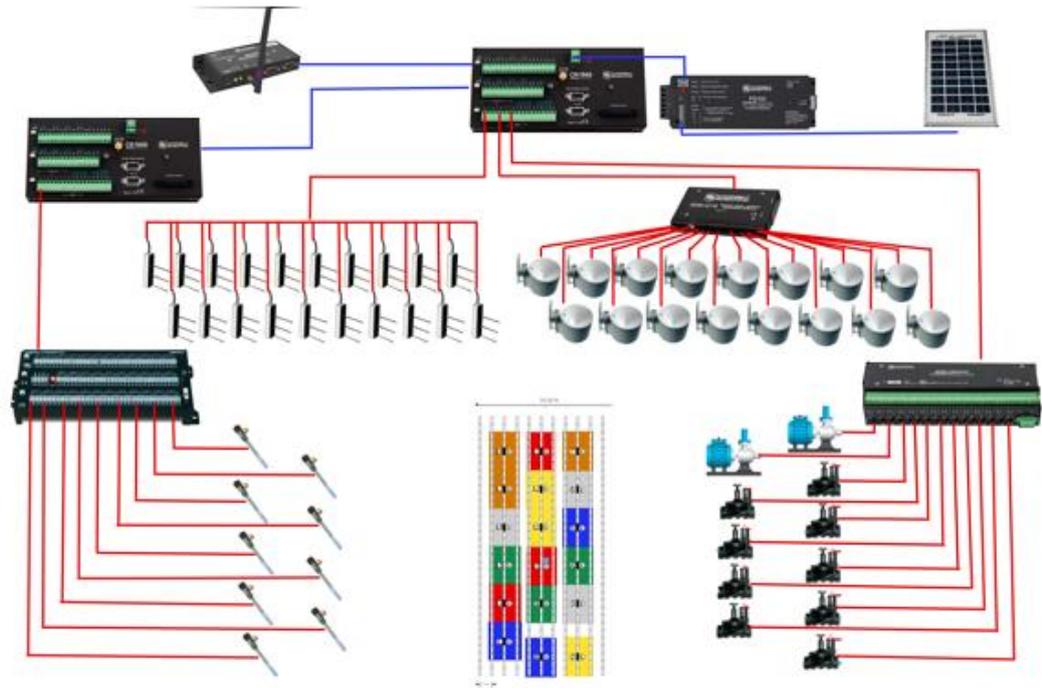


Figura 15. Equipo, diseño y distribución eléctrica de cada dispositivo utilizado en los tratamientos con riego por bandeja de demanda CDI y TRH. Elaborado por técnico Julio Vega.

El control de las otras nueve unidades (9 Válvulas y 2 bombas) experimentales era realizado por un Temporizador con registro de un sensor dieléctrico capacitiva (DECAGON, Mod. GS3) construido por IngPlantae.

Las conexiones eléctricas permitieron que cada sector se maneja independiente, tanto en el registro como el control de riego (Fig. 16).



Figura 16. Controlador y registrador de datos (CR1000) y conexiones e instalación del cableado eléctrico, cada cable representa una conexión con cada una de las parcelas de investigación de forma independiente.

Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) con registro de un sensor dieléctrico capacitiva (DECAGON, Mod. GS3), Tensiómetro Irrrometer Modelo LT y un Pluviómetro ECRN-100.

El algoritmo de control (Fig. 17) se basó en ajustar constantemente el volumen de agua aplicado en teniendo como indicador cierto porcentaje de drenaje determinado por el usuario. Mediante la activación de la bomba de riego debido a un agotamiento correlacionado con la potencial mátrico, se agrega cierta cantidad de minutos que a su vez significa cierta cantidad de agua aplicada.

Al inicio del día antes de que salga el sol, todos los tratamientos vuelven a capacidad de contenedor mediante un “Protocolo CC”, este busca que el algoritmo de control inicie la búsqueda de la lámina de agua desde capacidad de

contenedor hasta un mismo punto de agotamiento, lo que en teoría siempre será la misma duración de minutos.

El algoritmo sigue el siguiente diagrama de la Figura 17 :

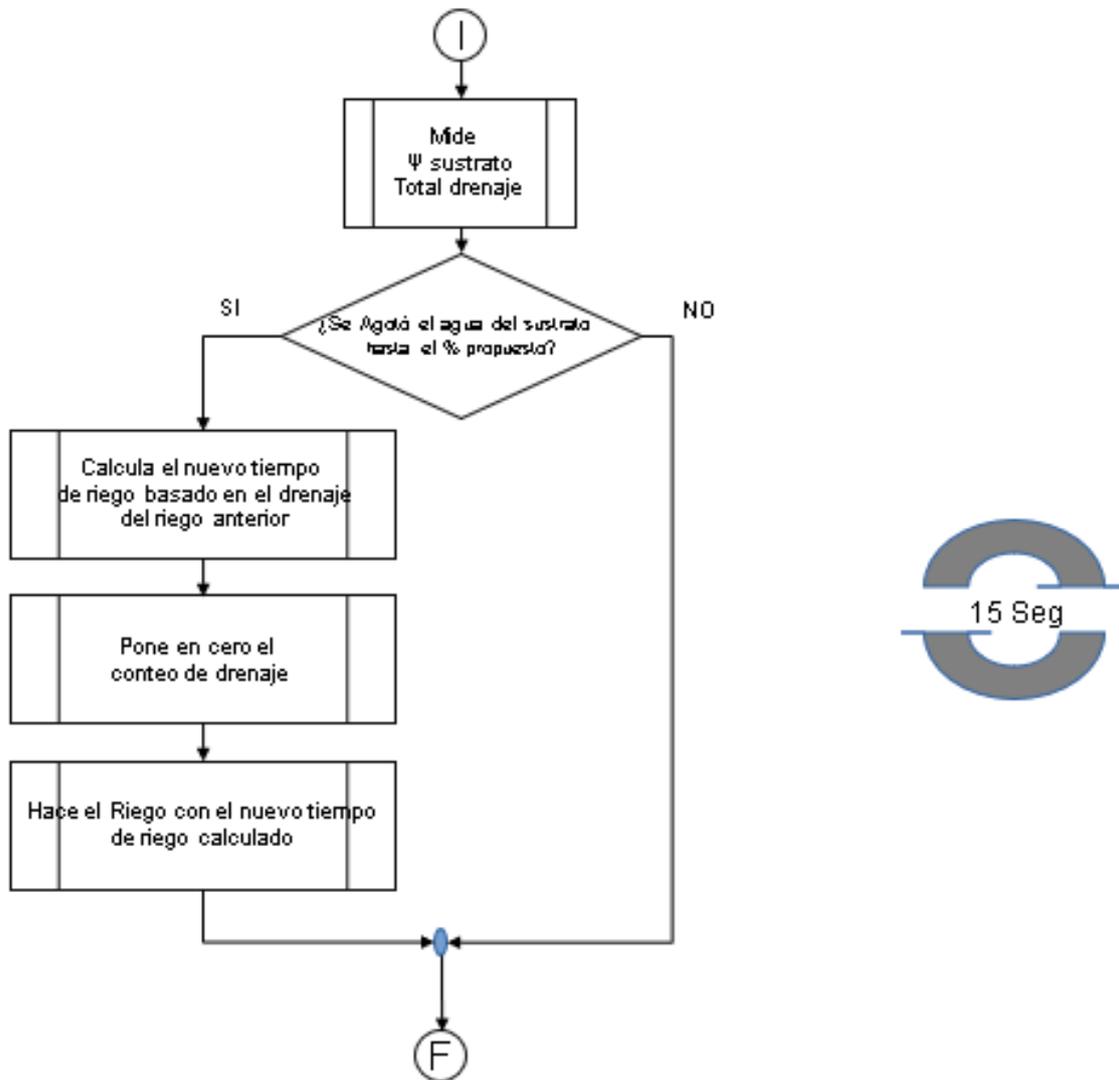


Figura 17. Algoritmo de control para el funcionamiento de la canaleta de demanda inteligente (CDI). Diseñado por el Ing. Agr. Carlos Huertas y adaptado al lenguaje de programación por Julio Vega.

El hardware de la CDI consiste en una estructura de madera forrada en plástico transparente que funciona como recolector de solución lixiviada, el

tensiómetro, la sonda dieléctrica y el pluviómetro, sus dimensiones son de 0.40 metros de ancho x 1,10 metros de largo (Fig.18)



Figura 18. Canaleta de Demanda Inteligente (CDI) en un cultivo de tomate bajo invernadero.

Se diseñó una estructura para darle soporte a los tensiómetros disminuir el riesgo que estos se muevan y pierdan contacto la punta de cerámica con el sustrato (Fig. 19).



Figura 19. Estructura de soporte de los tensiómetros (a) instalados en el contenedor de fibra de coco (b) que fue colocado en la CDI con cultivo. (Estructura diseñada por Julio Vega)

Diseño experimental

Este consistió bifactorial de 2 x 3, que combinaba ambos métodos de control de riego (TRH y CDI) y los tres porcentajes de agotamiento (10, 20 y 30%), para un total de 6 tratamientos combinados. Cada unidad experimental (UE) se conformó de 45 plantas equivalentes a 15 tablas (3 plantas por tabla). Se utilizaron hileras laterales y plantas al final de cada hilera como borde.

El área del experimento estaba conformada por 12 hileras espaciadas a 1,5 m, con 33 tablas de fibra de coco cada una, para un total de 396 tablas (Aprox. 600 m²). En cada tabla de fibra de coco se colocó una planta cada 0,33 m (3 plantas/tabla), para un total de 1188 plantas para una densidad de 2 plantas por m² (1,5 m x 0,33 m), Las UE de cada tratamiento se agrupan según el color (Fig. 20).

:

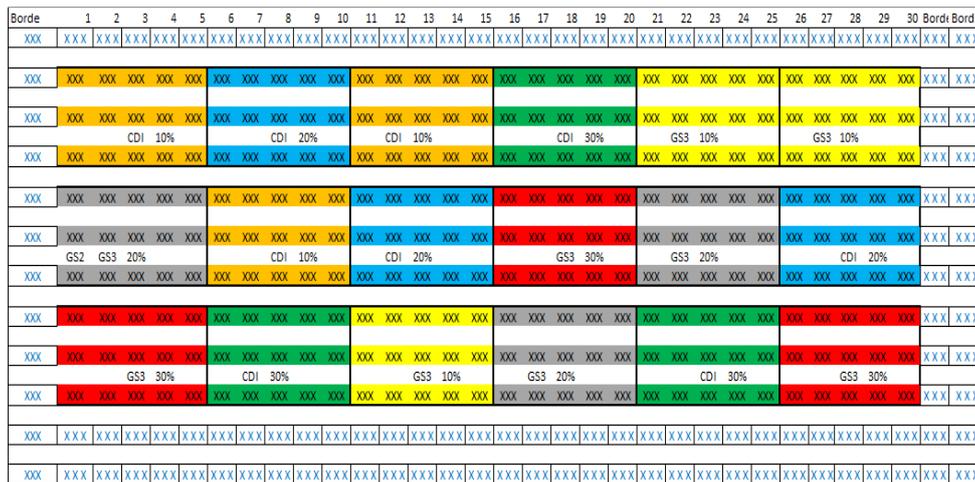


Figura 20. Ilustración del diseño experimental, mostrando los 6 tratamientos por tres repeticiones (diferentes colores). Las “X” de color azul muestran el borde a dejar en la parcela, las “X” de color negro simbolizan las plantas. Para efecto descriptivo GS3 corresponde a los tratamientos TRH y CDI a los de la canaleta de demanda inteligente. Las UE de cada tratamiento se agrupan según el color: anaranjado (CDI₁₀), azul (CDI₂₀), verde (CDI₃₀), amarillo (TRH₁₀), gris (TRH₂₀) y rojo (THR₁₀).

Variables de respuesta

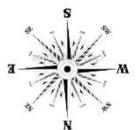
Se evaluaron tres tipos de variables: indicadores de rendimiento, indicadores de manejo de riego e indicadores económicos.

1. Las variables de riego y sus componentes fueron:

1.1. Porcentaje de θ (% v/v) del sustrato medida en tiempo real por 24 horas con el dispositivo GS3, donde se realizó el siguiente análisis para caracterizar la θ :

1.1.1. θ (% v/v) donde iniciaron los riegos. Los controladores registran los riegos donde iniciaron, al final se realizó un promedio de estos datos y su respectivo análisis.

1.1.2. θ (% v/v) después de finalizado el protocolo CC. Los controladores registran la θ (%) después de terminado el protocolo, al final se realizó un promedio de estos datos y su respectivo análisis.



- 1.1.3. θ (% v/v) antes del protocolo CC. Los controladores registran la θ (% v/v) antes de terminado el protocolo, al final se realizó un promedio de estos datos y su respectivo análisis.
 - 1.1.4. Promedio de θ (% v/v) diario de todo el ciclo. Al final se realizó un promedio de estos datos y su respectivo análisis.
 - 1.1.5. Promedio de la desviación estándar (D.E.) diario de todo el ciclo.
2. Las variables de rendimiento:
 - 2.1. Rendimiento por unidad de superficie (RS). Peso de frutos obtenido por tratamiento en todas las cosechas realizadas (kg m^{-2}).
 - 2.2. La eficiencia de uso del agua con rendimiento comercial ($\text{EUA}_c = \text{kg m}^{-3}$): la suma de kg m^{-2} de calidad primera y segunda, una vez obtenido la cosecha acumulada. La eficiencia de uso del agua con rendimiento total ($\text{EUA}_T = \text{kg m}^{-3}$): la suma de kg m^{-2} de la calidad primera, segunda y desecho, una vez obtenido la cosecha acumulada.
 - 2.3. Peso seco de toda la planta (sin división por órganos) al final del ciclo, para determinar el total de materia seca acumulada.
 3. Indicadores económicos:
 - 3.1. Costos variables. Finaliza con todos los costos de cada método de control, sin contemplar el valor de los equipos y prácticas culturales en común (podas, entutorados, aplicaciones MIP) mediante la metodología de presupuestos parciales, se registra el tiempo que se dura programando el plan de riego, monitoreo de los drenajes, mantenimiento de los equipos (horas de trabajo y costos de repuestos).

Materia seca

Se seleccionó una planta por paca en cada unidad de muestreo, garantizado que quede un borde de este a oeste de dos plantas, para no interferir en el desarrollo de las otras pacas bajo tratamiento, el doble cuadro negro indica donde irá la sonda capacitiva y la CDI.

XXX									
60	90		150	120	60	90		150	120
XXX									
		CDI	10%			GS3	10%		
XXX									

Figura 21. Croquis descriptivo de la forma que se hará el muestreo destructivo, la X roja indica la planta que será destruida según el día después de trasplante, el doble cuadro interior negro indica donde estará ubicada el TRH y la CDI.

Rendimiento

Se utilizaron 26 plantas para determinar el rendimiento de las cosechas realizadas semanalmente. El rendimiento fue dividido en tres calidades, primera (>250-190 g) segunda (190-140 g) desecho menos de (140 gramos) esta caracterización se hizo en base norma de calidad de Walt-Mart, 2017.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis utilizando el programa estadístico InfoStat versión 2017. A los datos se le aplicaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilks) y homogeneidad antes de los análisis de varianza. Cuando se cumplieron dichos supuestos los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar si hubo efecto de la interacción método x porcentaje de agotamiento o efecto independiente de ambos factores. En caso de determinar efectos estadísticamente significativos ($P \leq 0,05$), sobre la interacción entre método y porcentaje de agotamiento, se realizó un análisis de los efectos simples de ambos factores. En los casos donde no hubo efecto de la interacción ($P \geq 0,05$), y hubo efectos independientes de ambos factores, se analizó el efecto principal del factor que fue estadísticamente significativo ($P \leq 0,05$).

Resultados

I. Curva “*In situ*”

El Cuadro 7 describe los diferentes contenidos de θ (% v/v) y potencial mátrico (kPa) según fábrica (FICO) y determinado “*In Situ*”, así como el tipo agua disponible (CC, agua de reserva) y puntos de agotamiento (10%, 20% y 30%). Se observa que, al comparar las metodologías, los puntos CC, 10%, 20%, 30% y agua de reserva, FICO reporta el valor para CC en 1kPa, mientras que con la curva “*In situ*” tiene un valor de 2,3 kPa (n=4, D.E.=0.004). Por otra parte, la θ (% v/v) no presenta diferencias al comparar las mediciones entre las metodologías “*In situ*” y FICO:

Cuadro 7. Potencial mátrico(kPa) y porcentajes de humedad volumétrica según porcentaje de agotamiento del agua disponible en el sustrato.

Porcentaje de agotamiento	Potencial mátrico (kPa)		Humedad volumétrica (% v/v)	
	“ <i>In situ</i> ”	FICO***	<i>In Situ</i>	FICO
0	2,3*	1	63,1**	61
10	3,1	-	55,8	55,1
20	3,9	-	50,6	49,8
30	4,6	-	47,7	45,2

*(n=4, D.E.=0,004). **(n=9, D.E.=0,260), ***valores determinados en fábrica (FICO®)

La figura 22 indica la curva característica de liberación de aire y desorción de agua, donde se reporta el agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco. Se muestra los contenidos de θ a saturación (0 kPa, 90%), a capacidad de contenedor (2,3 kPa, 63%), a 10% de agotamiento (3,1 kPa, 55,8%), a 20% de agotamiento (3,9 kPa, 50,6%) a 30% de agotamiento (4,6 kPa, 47,7%), y el punto de marchitez permanente (10 kPa, 32%).

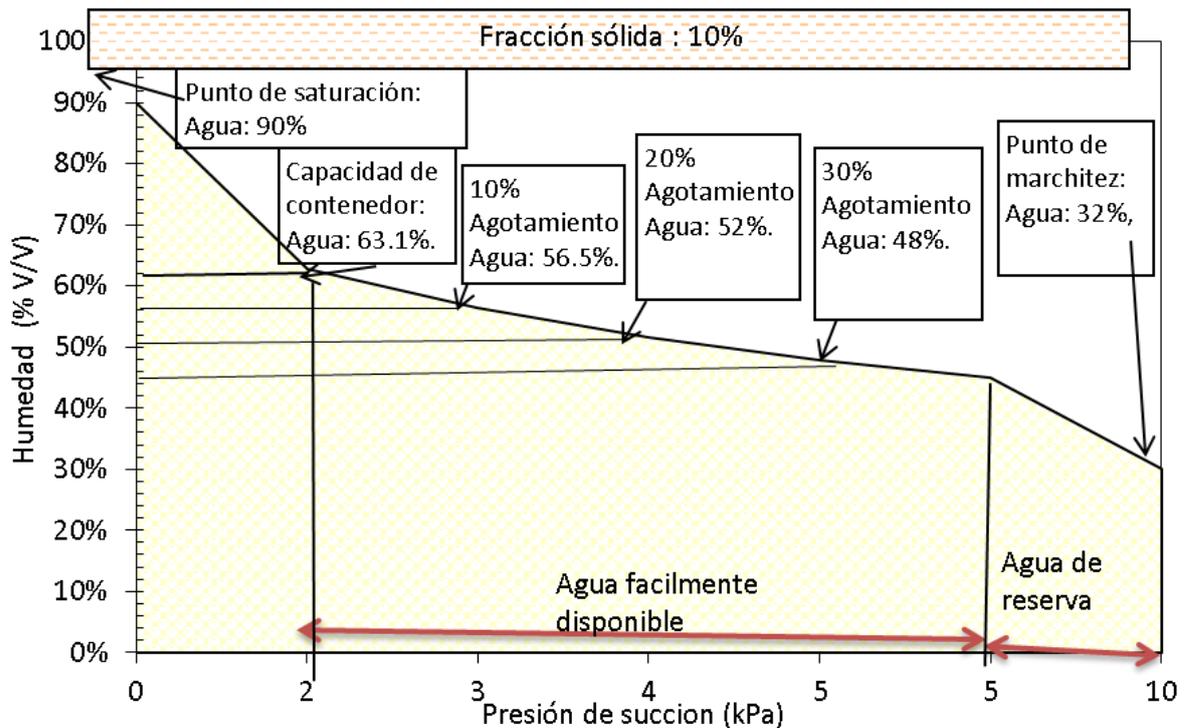


Figura 22. Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en el sustrato de fibra de coco, utilizado en el experimento.

II. Efectos de los tratamientos sobre el contenido de humedad (θ) en el sustrato.

La interacción entre ambos factores (método y agotamiento) afectó significativamente ($P \leq 0,05$) la θ en el sustrato, al momento de iniciar los riegos en los diferentes tratamientos.

El tratamiento CDI₃₀ mantuvo los arranques de manera diferente al TRH₃₀, este último se comportó de forma similar a un CDI₂₀, ambos iniciaron los riegos aproximadamente al 51% de agotamiento. A partir de aquí, el TRH₂₀, CDI₁₀ y TRH₁₀ estuvieron cerca del punto CC, incluso TRH₁₀ estuvo arriba de CC, (Cuadro 8).

Cuadro 8. Promedios de la θ (%v/v) en el sustrato al momento de iniciar los riegos en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Promedio (% v/v)	n*	E.E.**	Significancia***
CDI ₃₀	48,85	219	0,17	A
TRH ₃₀	51,68	219	0,17	B
CDI ₂₀	51,75	219	0,17	B
TRH ₂₀	59,77	219	0,17	C
CDI ₁₀	60,50	219	0,17	D
TRH ₁₀	65,78	219	0,17	E

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Los contenidos de θ (% v/v) antes de iniciar el protocolo de CC durante todo el ciclo fueron afectados por la interacción entre ambos factores ($P \leq 0,05$). Por tanto, se observaron tendencias diferentes en el comportamiento de la θ entre ambos métodos de control de riego, conforme se incrementó el nivel de agotamiento en el sustrato de 10% a 30% ($P > 0,05$). El CDI₃₀ mantuvo el nivel más bajo de humedad, seguido por el TRH₃₀, CDI₂₀ y TRH₂₀. De ahí en adelante el CDI₁₀ y el TRH₁₀ estuvieron cerca del punto CC (Cuadro 9).

Cuadro 9. Promedios de la θ (%v/v) antes de iniciar el protocolo de capacidad de campo en los diferentes tratamientos

Tratamiento	Promedios θ (%)	n*	E.E.**	Significancia***
CDI ₃₀	47,44	219	0.18	A
TRH ₃₀	49,15	219	0.18	B
CDI ₂₀	50,57	219	0.18	C
TRH ₂₀	55,73	219	0.18	D
CDI ₁₀	58,73	219	0.18	E
TRH ₁₀	63,18	219	0.18	F

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

La interacción entre ambos factores afectó ($P \leq 0,05$) la θ (% v/v) en el protocolo a CC. Al analizar las diferencias entre los tratamientos, se observó que el CDI₃₀ tuvo un comportamiento similar a TRH₂₀ y diferente a los demás tratamientos, que mostraron diferencias entre ellos. El CDI₁₀ se mantuvo cerca de CC y el TRH₁₀ fue superior a la CC y el TRH₃₀ el punto más bajo con un 54,08% (Cuadro 10).

Cuadro 10. Promedios de la θ (%v/v) en el protocolo de CC en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Promedios θ (%v/v)	n*	E.E.**	Significancia***
TRH ₃₀	54,08	219	0,17	A
CDI ₂₀	56,95	219	0,17	B
CDI ₃₀	60,59	219	0,17	C
TRH ₂₀	60,93	219	0,17	C
CDI ₁₀	62,50	219	0,17	D
TRH ₁₀	66,18	219	0,17	E

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

En el Cuadro 11 se compara la θ (% v/v) donde debió encender los riegos según *In situ* y donde iniciaron los riegos las CDI (Cuadro 8).

En el 10% de agotamiento los riegos debieron iniciar en 55,82% sin embargo, las medias iniciaron a 60,50% para el CDI y 65,78 % para el TRH. Los agotamientos de 20% iniciaron en 51,75% (CDI) y 59,77% (TRH) que debió ser 50,57%, finalmente en 30% de agotamiento los riegos iniciaron en 48,85% (CDI) y 51,68% (TRH) y debió ser 47,74 % (En ambos casos sólo CDI estuvo cerca de “*In situ*”)

Cuadro 11. Contenido θ (% v/v) en el sustrato, según agotamiento (%), curva *in situ* y método de control de riego.

Agotamiento (%)	Método		
	Curva <i>In situ</i>	CDI	TRH
10%	55,82	60,5	65,78
20%	50,57	51,75	59,77
30%	47,74	48,85	51,68

La variabilidad diaria en la θ (% v/v) medida por medio de las desviaciones estándar (D.E.) fue afectada por la interacción de ambos factores ($P \leq 0,05$). En el CDI₁₀ y CDI₂₀ la D.E. fue menor que en TRH₁₀, TRH₂₀ (Cuadro 12). Finalmente, el TRH₃₀ tuvo menos variación que la CDI₃₀.

Cuadro 12. Promedios de las desviaciones estándar (DE) de la θ (%v/v) según tratamiento

Tratamiento	Promedio θ (%v/v)	n*	E.E.**	Significancia***
CDI ₁₀	4,36	62	0,46	A
TRH ₁₀	6,76	62	0,46	B
CDI ₂₀	4,57	62	0,46	A
TRH ₂₀	6,36	62	0,46	B
TRH ₃₀	6,95	62	0,46	A
CDI ₃₀	7,67	62	0,46	B

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

La interacción entre ambos factores ($P \leq 0,05$) afectó la D.E. de la θ de todo el ciclo (%v/v), donde el TRH₃₀ obtuvo el promedio más bajo. El CDI₃₀ y CDI₂₀ no tuvieron diferencias significativas, el TRH₂₀ y CDI₁₀ a pesar de que tuvieron diferencias significativas entre ellos, fueron los tratamientos que estuvieron más

cerca de CC. El TRH₁₀ en promedio estuvo arriba de CC, tendiendo a saturar el sustrato (Cuadro 13).

Cuadro 13. Promedio de la θ (%v/v) del ciclo según el agotamiento (%) y el método de control.

Tratamiento	Promedio θ (%v/v)	n*	E.E.**	Significancia***
CDI ₃₀	46,85	62	0,6	A
TRH ₃₀	51,93	62	0,6	B
CDI ₂₀	53,17	62	0,6	B
TRH ₂₀	58,48	62	0,6	C
CDI ₁₀	60,55	62	0,6	D
TRH ₁₀	65,09	62	0,6	E

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Rendimiento

La interacción de ambos factores ($P \leq 0,05$) afectó el rendimiento de calidad primera (kg m^{-2}). El rendimiento más alto lo obtuvo el CDI₃₀, seguido por CDI₂₀, ambas con diferencias significativas, los tratamientos TRH₁₀, TRH₂₀ y CDI₁₀ no presentaron diferencias estadísticas entre ellos, mientras que el TRH₃₀ obtuvo el rendimiento más bajo (Cuadro 14).

Cuadro 14. Promedio del rendimiento calidad 1 (kg m^{-2}) obtenido durante el ciclo según el tratamiento.

Tratamiento	Promedio (kg m^{-2})	n*	E.E.**	Significancia***
TRH ₃₀	4,75	3	0,32	A
CDI ₁₀	6,05	3	0,32	B
TRH ₂₀	6,29	3	0,32	B
TRH ₁₀	6,38	3	0,32	B
CDI ₂₀	9,28	3	0,32	C
CDI ₃₀	13,2	3	0,32	D

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

La interacción entre ambos factores ($P \leq 0,05$) afectó el rendimiento de segunda calidad (kg m^{-2}), donde el rendimiento más alto lo obtuvo el CDI₃₀ con diferencias significativas respecto a los tratamientos CDI₁₀, TRH₂₀ y CDI₂₀, estos últimos no presentaron diferencias estadísticas entre ellos, el tratamiento que obtuvo el rendimiento más bajo fue el TRH₃₀ (Cuadro 15).

Cuadro 15. Rendimiento promedio de frutos de calidad 2 (kg m^2)

obtenido durante el ciclo según tratamiento.

Tratamiento	Promedio (kg m^{-2})	n*	E.E.**	Significancia***	
TRH ₃₀	1,90	3	0,31	A	
CDI ₁₀	2,15	3	0,31	A	B
TRH ₁₀	2,35	3	0,31	A	B
TRH ₂₀	2,42	3	0,31	A	B
CDI ₂₀	2,89	3	0,31		B
CDI ₃₀	4,25	3	0,31		C

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Por su parte la interacción de ambos factores ($P \leq 0,05$) afectó el desecho (kg m^{-2}). La cantidad de desecho más alta la obtuvo el CDI₃₀ y CDI₂₀ con diferencias significativas, los tratamientos CDI₁₀, TRH₁₀, TRH₂₀ y TRH₃₀ y no presentaron diferencias estadísticas entre ellos ($P \leq 0,05$) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Promedios del desecho (kg m⁻²) obtenido durante el ciclo según cada tratamiento.

Tratamiento	Promedios	n*	E.E.**	Significancia***	
TRH ₃₀	0,32	3	0,073	A	
CDI ₁₀	0,37	3	0,073	A	
TRH ₂₀	0,39	3	0,073	A	
TRH ₁₀	0,45	3	0,073	A	B
CDI ₃₀	0,63	3	0,073		B
CDI ₂₀	0,69	3	0,073		B

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$)

Por otro la, en cuanto al peso seco de las plantas la interacción de ambos factores ($P \geq 0,05$) no fue afectada. Al analizar los efectos simples tampoco hubo diferencias estadísticas tanto en la variable del método como en la variable agotamiento (%). Únicamente se observa una tendencia en los casos CDI a que a mayor porcentaje menor materia seca producida. (Cuadro 17).

Cuadro 17. Promedios del peso seco (kg m²) obtenido durante el ciclo según el tratamiento.

Tratamiento	Promedios (kg m ⁻²)	n*	E.E.**	Significancia***	
CDI ₂₀	0,99	3	0,12	A	
TRH ₁₀	1,06	3	0,12	A	
TRH ₃₀	1,11	3	0,12	A	
CDI ₃₀	1,20	3	0,12	A	
TRH ₂₀	1,28	3	0,12	A	
CDI ₁₀	1,28	3	0,12	A	

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Eficiencia de uso del agua (EUA)

La interacción de ambos factores ($P \leq 0,05$) afectó la EUA_C y EUA_T (kg m^3), donde la mayor eficiencia la obtuvo el CDI_{30} , seguido por CDI_{20} , ambas significativamente diferentes. Los tratamientos TRH_{10} , TRH_{20} y CDI_{10} no presentaron diferencias estadísticas entre ellos, el tratamiento que obtuvo el rendimiento más bajo fue el THR_{30} , Cuadro 18 y 19.

Cuadro 18. Uso eficiente del agua comercial establecido como kg de producto comercial obtenido por m^3 de agua según cada tratamiento. ($EUA_C, \text{kg m}^{-3}$).

Método	Promedio (kg m^{-3})	n*	E.E.**	Significancia***
THR_{30}	8,63	3	0,44	A
THR_{10}	10,32	3	0,44	B
THR_{20}	10,76	3	0,44	B
CDI_{10}	10,89	3	0,44	B
CDI_{20}	15,05	3	0,44	C
CDI_{30}	22,10	3	0,44	D

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Cuadro 19. Promedio del uso eficiente del agua total (EUA_T kg m⁻³) obtenido durante el ciclo según cada tratamiento.

Tratamiento	Promedio (kg m ⁻³)	n*	E.E.**	Significancia***
THR ₃₀	10,29	3	0,68	A
THR ₁₀	12,46	3	0,68	B
THR ₂₀	12,72	3	0,68	B
CDI ₁₀	12,84	3	0,68	B
CDI ₂₀	18,19	3	0,68	C
CDI ₃₀	25,43	3	0,68	D

*número de observaciones, ** error estándar de la media de la θ (%v/v), ***letras diferentes indican efecto estadísticamente significativo (Prueba LSD Fisher, $P \leq 0,05$).

Presupuestos parciales

Según el MTSS (2017) el salario mínimo de un Técnico de Educación Superior como encargado del mantenimiento de los equipos es de ¢438542,68 (¢2284 hora). En la Figura 23, muestra la diferencia en costo que hubo que invertir en los diferentes tratamientos. El rubro que más consumió fue la Programación del TRH con un 86% más en comparación de la Programación CDI. Pero al contrario el mantenimiento de la CDI un 87% fue superior a TRH.

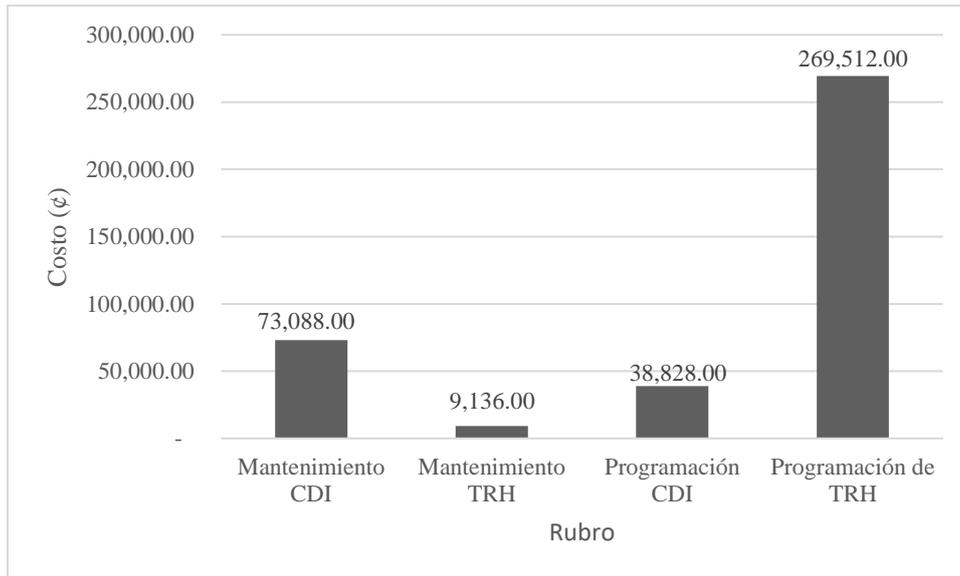


Figura 23. Costos variables generados por el experimento. Se muestran los rubros de Programación y mantenimiento según la CDI y TRH, así como su costo en colones costarricenses.

Discusión

Las diferencias en los contenidos de θ entre la curva de desorción de agua reportada de fábrica y la curva obtenida “*In situ*” (Cuadro 7), se deben al comportamiento físico de la fibra de coco; se ha reportado que la granulometría y la forma del contenedor, afectan el uso de umbrales de θ (% v/v) para el manejo del riego, ya que influyen en el volumen y la frecuencia de este (Arguedas *et al.* 2006), y a pesar de la disponibilidad de sensores estos tienen problemas al adaptarlos en sustratos o suelos con estructuras físicas gruesas o arenosas (Buttaro *et al.* 2015; Krüger *et al.* 1999; Van Der Veken, Michels *et al.* 1982).

Por tanto, aunque se cuente con fichas técnicas generadas por los fabricantes de sustratos (Figura. 4), la variabilidad en las características físicas entre lotes y en los métodos usados para determinar dichas características, dificulta extrapolar los valores de θ reportados a nivel práctico. En la literatura se han reportado porcentajes variables de θ a diferente potencial mátrico. Al respecto, Soto, (2018) para fibra de coco se reportaron valores de 56% a 1,0 kPa (CC), 44% a 2,5 kPa, 38% a 5 kPa y 30% a 10 kPa (PMP= punto de marchitez permanente). Otros estudio reportaron θ de 58% a 0,5 kPa (CC) y 27,7% a 10 kPa (Mora, *et al.* 2005), y Quintero y Gonzales en 0,9 kPa (CC).

Ante estos escenarios es fundamental determinar una curva de desorción de contenido volumétrico “*In situ*”, con datos específicos en el campo de cultivo y con base en las características físicas del lote del sustrato (Fig. 22). Estudios bajo esta metodología han reportado buen control de la humedad para el buen manejo del cultivo (Soto, 2018; Thompson *et al.* 2007) .

Los contenidos de θ en el sustrato al inicio del riego en los tratamientos con control CDI, estuvieron más cerca de los valores de θ determinados “*In situ*”, que aquellos controlados por el método TRH (Cuadro 11). Esto se debe a que los tensiómetros LT en sustratos, han logrado ser eficientes en el control de humedad propiamente en los sustratos (Colla *et al.* 2014; Fanasca *et al.* 2006; Rouphael *et al.* 2004) y por su parte los TRH tienen un problema de reacción, sujeto al error de apreciación humana y falta de medida objetivas (datos) al tratar

de controlar la humedad, ante cambios bruscos de clima, ocasionan un exceso o déficit hídrico temporal para la plantación, y generan estrés hasta que se ajuste manualmente.

El evaluar cuál de los dos equipos logró iniciar los riegos (Cuadro 8) lo más exacto y preciso posible, permite determinar puntos de mejora, determinadas frecuencias o porcentajes de agotamiento ideales para el cultivo, así como determinar metodologías de control para mejorar constantemente los rendimientos (Segura-Castruita *et al.* 2011; Soto, 2018).

Por ejemplo, el rendimiento de un cultivo viene dado por la capacidad de acumular biomasa en los órganos que se destinan a la cosecha. Cultivos como el tomate son en mayoría caracterizados en invernadero, por tener un crecimiento indeterminado, siendo los frutos los principales órganos sumideros y compitiendo con los órganos vegetativos por los asimilados disponibles. El balance apropiado de foto-asimilados para las distintas partes de la planta, tiene importancia para incrementar los rendimientos, lo cual se puede obtener a través de una adecuada relación fuente/sumidero (Peil y Galvez, 2005)

El que la humedad de sustrato esté cerca de CC, genera que la planta tenga crecimientos y desarrollo de órganos más vegetativos que generativos, ya que existe menos estrés hídrico, caso contrario, el conocer los puntos donde empiezan a generarse marchitez, permite generar cambios a plantas más generativas ya que la regulación estomática es controlada a través de señales químicas enviadas desde las raíces hasta las hojas (Kirda *et al.* 2004, Lardizabal, 2010)

Por lo expuesto anteriormente, para determinar cuál de los dos métodos tuvo mayor variabilidad o fue menos preciso, se utilizó la D.E. diaria de la θ preestablecida al momento de inicio de los riegos. Los resultados mostraron que independientemente del nivel de agotamiento (10, 20 o 30%), en los cultivos donde el riego fue controlado por método CDI, la D.E. fue menor que por el método de riego TRH (Cuadro 12).

Debe tenerse especial cuidado con agotamientos más pronunciados como el CDI₃₀, ya que estos en general presentaron más problemas de cavitación por parte del tensiómetro (CDI₁₀ y CDI₂₀). Por ende, requieren un protocolo de mantenimiento y fiscalización más frecuente (Cuadro 12). En otros

estudios se han presentado problemas similares, en los que se establece que un área importante de la superficie de contacto de la capsula cerámica, al disminuir la humedad, entra en contacto con aire, provocando cavitación del tensiómetro, lo que ocasiona mediciones erróneas. (Nemali *et al.* 2007).

Para saber si los niveles de agotamientos (%) eran establecidos desde CC, se formularon las variables del “protocolo CC” (Cuadro 10). Por el error en la capacidad de respuesta o “reacción” del THR mencionado anteriormente, en dichos tratamientos se generaron problemas de saturación. En el tratamiento TRH con 10% de agotamiento, el promedio de θ se mantuvo en 66,18%, superior al contenido de θ a CC. Esta condición ocasiona hipoxia, que afecta el crecimiento de la planta, el rendimiento y la calidad de frutos. Lo anterior ha sido explicado por diferentes autores ya bajo estas condiciones se alteran procesos fisiológicos y bioquímicos tales como el potencial hídrico (Drew, 1997), se reduce la conductancia estomática (Vartapetian y Jackson, 1997), se afecta además la absorción, el transporte de agua y de nutrientes (Stiepniewski y Przywara, 1992). Los TRH₃₀ y CDI₂₀ fueron los tratamientos donde no llegaron a CC y son explicados por la variabilidad de los TRH y por ajustes que aún requiere hacerse al algoritmo de control de las CDI según los ajustes en el cálculo del volumen de riego (Cuadro 10).

Por ende, en rendimiento tanto de primera como de segunda calidad, el CDI₃₀ y CDI₂₀ obtuvieron los mayores rendimientos, debido a una mayor precisión en la ejecución de los protocolos de CC y de inicios de riego. En estos casos no hubo condiciones de saturación o hipoxia que afectaran negativamente el rendimiento (Cuadro 14 y 15).

Lardizabal, (2010) postula que mantener frecuencias de riego de manera controlada, estresando hídricamente el cultivo, ayuda a que las plantas se vuelvan más generativas, logrando producir más que una planta que esté cercana a CC en condiciones sin estrés. Es postulación es confirmada por esta investigación, ya que los tratamientos TRH₁₀, TRH₂₀ y CDI₁₀, mostraron un comportamiento muy similar con tendencia vegetativa y bajos rendimiento. El tratamiento CDI₁₀ fue el segundo con menor rendimiento, ya que la θ estuvo cerca de CC con menor variabilidad respecto a los TRH. Por tanto, durante el ciclo del experimento dicho tratamiento fue más preciso en mantenerse cerca de

CC que los TRH, generando menos estrés por déficit hídrico, pero generando cierto grado de saturación en ciertas épocas del ciclo del cultivo.

Sin embargo, se debe analizar si el nivel de estrés hídrico es suficiente como para afectar el rendimiento, en estudios realizados por Soto, (2018) en cultivos de chile y tomate en fibra de coco bajo invernadero, se determinó que a una θ de 32%, ya presentan síntomas de marchitez; este efecto es el que explica la razón por la que el TRH₃₀ presenta el menor rendimiento calidad primera y segunda, ya que en los promedios de θ del ciclo (Cuadro. 13) fueron las más bajas (46,85% v/v), ofreciendo diferencias estadísticas con respecto a los demás afectando negativamente el cultivo.

En la literatura reporta rendimientos de tomate bajo invernadero, en el rango de 17,6 a 26,9 kg m⁻² (Macías-Duarte *et al.* 2010; Bastida, 2012), valores en los que se encuentran el mejor rendimiento total (comercial más desecho) CDI₃₀ que rondó 18.14 kg m². Por su parte la cantidad de frutos de desecho fue afectada por la interacción de los factores, donde los tratamientos CDI con 30 y 20% la mayor cantidad de desecho. Los demás tratamientos no tuvieron diferencias significativas entre ellos, con un comportamiento en orden decreciente del rendimiento. Por lo anterior, las diferencias entre tratamientos pueden deberse a que los CDI₂₀ y ₃₀ produjeron más cantidad de materia seca y kg de tomate, implicando que existe también mayor cantidad de desecho. (Cuadro 16).

La razón por la cual las interacciones y los efectos independientes de los factores no afectaran el peso seco (Cuadro 17), se puede deber especialmente a un error de metodología al no considerar más plantas de evaluación lo que no permite tener suficiente confiabilidad. Estudios reportan mínimo 3 (Bastida, 2012) 4 (Juárez-Maldonado *et al.* 2015) plantas por repetición, a diferencia de esta investigación que sólo tuvo 1 planta por repetición y 3 por tratamiento. Lo único que se puede notar es una tendencia a que los rendimientos más altos de calidad primera y segunda tienden a tener menos peso seco que los que tuvieron menor rendimiento; esto es coincidente con la teoría de que plantas con cierto estrés hídrico pueden producir más frutos que área foliar (hojas, tallo) en comportamientos generativos (Lardizabal, 2010) Otro factor importante que se podría incorporar en este tipo de estudios, es medir particiones por órganos y

relaciones fuente /sumidero para determinar posibles comportamientos de crecimiento (Balaguera *et al.* 2008; Peil y Galvez, 2005). Evaluar los tratamientos por materia seca según sus órganos sí ha permitido encontrar diferencias significativas entre tiramientos a diferentes déficits hídricos (Patanè *et al.* 2011)

En el EUA (kg m^3) (Cuadro 18 y 19) los tratamientos CDI debido obtuvieron rendimientos más altos los TRH. Dentro de las razones coinciden con los párrafos anteriores sobre el rendimiento de primera y segunda y la relación con estrés hídrico. Otra razón es que el método CDI logra ajustar mejor el volumen de riego y los drenajes que en el caso de los TRH gracias al algoritmo de control, lo que se refleja en una mejor producción con base en una menor cantidad de agua. Por otra parte, los tratamientos CDI con agotamientos de 30% y 20%, mostraron mayor EUA, por lo que se mantiene la tendencia a que a un agotamiento más distanciado de CC y controlado por sistema automáticos permite producir más con menos agua. Datos de otras investigaciones reportan $26,52 \text{ kg/m}^3$ (González *et al.* 2008) y $28,2 \text{ kg m}^3$ (González *et al.* 2008) en rendimiento total, datos similares al tratamiento más alto de esta investigación (Cuadro 18). Además en rendimiento comercial se reportan datos de 10 a 23 kg m^3 (Patanè *et al.* 2011) datos similares en los que se encuentran los rendimientos comerciales de este experimento (Cuadro 19).

Finalmente, los costos variables (Figura 23) se nota cómo la programación TRH requirió mucha más inversión que en el caso de los CDI, debido a que los TRH deben de tener el ajuste constante de usuario ante los cambios de θ , clima y condiciones del cultivo, en la CDI es menor, ya que sólo es inversión de tiempo reprogramado fallas de software. Lo anterior demuestra una mayor practicidad del CDI para un agricultor, pues requiere de menos inversión en su tiempo para mantener el sistema funcionando correctamente.

También debe señalarse, el rubro de mantenimiento fue mayor en los tratamientos CDI, debido a que, por ser un prototipo en investigación, durante el ciclo existieron fallas a nivel de hardware que provocaron mayor inversión en CDI que en los THR, al mejorar el prototipo en base a la experiencia generada por esta investigación podría esperarse mejores mejorar sustanciales en la producción de tomate .

En términos generales se encontró que el efecto CDI₃₀ y CDI₂₀ fueron los que generan mayor respuesta en términos de rendimiento, precisión y exactitud al iniciar los riegos y promedios diarios de humedad volumétrica. Los que presentaron menor producción fueron los TRH en mayor variabilidad en el control. En general el método de control CDI fue el que mejor respuesta generó y los tratamientos con 30% y 20% fueron mejores que tratamientos con 10% de agotamiento. Los CDI tienen mayor costo en el mantenimiento y los TRH generaron mayor inversión en la programación de los volúmenes de riego.

Conclusiones

Se concluye que el sistema que ofrece una mejor respuesta del sistema de producción en términos de rendimiento, precisión, exactitud y en costos de programación, es el método de control de riego Canaleta de Demanda Inteligente (CDI).

Para asegurar la aplicación del principio de trabajo y dado que pueden variar las características de los sustratos, se hace necesario establecer curvas de retención "In situ" en el mismo lote de pacas utilizado, para evaluar la variabilidad contenido θ después de cada ciclo de cultivo.

Los tratamientos más determinantes sobre el contenido de humedad (θ) a la hora de iniciar los riegos fueron los CDI30 y CDI20, que permitieron acercar los momentos de inicio de riego a los valores definidos en las curvas de retención desarrolladas in situ.

Los tratamientos más determinantes en cuanto a los protocolos CC fueron el TRH10, ya que fue el tratamiento que mantuvo la humedad volumétrica sobre CC tendiendo a saturar y el TRH30 fue el tratamiento que menos contenido humedad (θ) reportó a CC.

Los tratamientos más determinantes basados en el contenido de humedad (θ) antes de iniciar el riego, fueron el TRH10, ya que en promedio fue el tratamiento que estuvo arriba de CC y el TRH30 que fue el tratamiento que menos contenido humedad (θ) reportó a CC.

Los TRH generan más variabilidad sobre la precisión y exactitud en comparación con CDI, por su parte, los tratamientos CDI10, CDI20 con la menor variabilidad; CDI30 requerirá mayor monitoreo para evitar variabilidad alta.

En relación con el promedio diario de humedad volumétrica (θ) durante el ciclo productivo, los tratamientos más determinantes fueron el TRH10 superando CC que tendiendo a saturar el sustrato; y así como CDI30, TRH30 y CDI20 se caracterizan por presentar los contenidos de humedad (θ) más alejado (menores) del punto CC.

El control de riego mediante el sistema de CDI bajo niveles de agotamiento (30% agotamiento) que acerquen a la planta a estrés hídrico, permite obtener mayores rendimientos, niveles de agotamiento (10 % agotamiento) cercanos a CC tiende a generar hipoxia.

Pese a las variaciones encontradas en la respuesta de las plantas en términos rendimiento (peso seco) se encontró que los métodos de control de riego no afectaron esta variable.

En términos de EUA todos los factores CDI expresaron mejor rendimiento debido a que se genera una mejor precisión y exactitud a la hora de controlar la frecuencia y el volumen de riego, gracias a su algoritmo de autocorrección.

Los CDI mostraron ser más eficientes a la hora de considerar el costo de programación, lo que genera que el productor tenga un ahorro en mano de obra. Sin embargo, Se considera que, por tratarse de un prototipo, se generó un proceso de ajuste en el diseño de la operación, lo cual incidió en mayor costo.

Recomendaciones

Se puede mejorar el estudio de los CDI evaluando otros agotamientos superiores a 10%.

Es necesario ajustar la metodología enfocada hacia el estudio de la relación fuente-sumidero para determinar el sí existe una interacción de factores afecten el peso seco.

Es importante evaluar la potencialidad de utilizar la CDI en otros cultivos y otras condiciones climáticas.

Literatura citada

- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., y Noguera, V. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource technology*, 82(3), 241–245.
- Ahmed, N., Bertels, K., y Al-Ars, Z. 2016. A comparison of seed-and-extend techniques in modern DNA read alignment algorithms. *En 2016 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)* , 1421-1428. <https://doi.org/10.1109/BIBM.2016.7822731>
- Ali, M. H. 2010. Crop Water Requirement and Irrigation Scheduling. En M. H. Ali (Ed.), *Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management*,. 1 (pp. 399-452). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6335-2_9
- Anderson, W. K., Hamza, M. A., Sharma, D. L., D'Antuono, M. F., Hoyle, F. C., Hill, N., ... Zaicou-Kunesch, C. 2005. The role of management in yield improvement of the wheat crop—a review with special emphasis on Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1137-1149. <https://doi.org/10.1071/AR05077>
- Araus, J. L., Slafer, G. A., Royo, C., y Serret, M. D. 2008. Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(6), 377-412. <https://doi.org/10.1080/07352680802467736>

- Arguedas-Rodriguez, F., D. Lea-Co, J., y H. Méndez, C. 2006. Calibration of Ech20 Probe Sensors to Accurately Monitor Water Status of Traditional and Alternative Substrates for Container Production.
- Anwar, M. R., Liu, D. L., Macadam, I., Kelly, G. 2013. Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1-2), 225-245.
- Azud. 2018. Sistema multiinyección *AZUD QGROW BASIC*. (Manual de usuario). España: Azud. Recuperado de <http://www.agrolinkholambra.com.br/pdf/fertirrigacao/AZUD-Multi-Qgrow-Basic.pdf>
- Balaguera, H. E., Herrera, J. G. Á., y Rodríguez, J. D. 2008. Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum L.*). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 246-255.
- Barrón Pérez, A., Sifuentes Ocegueda, E. L., Hernández Trujillo, J. M., y Universidad Autónoma de Nayarit. 2002. Apertura económica en las frutas y hortalizas de exportación en México: un acercamiento al estudio de la segmentación de los mercados de fuerza de trabajo. Tepic, Nayarit: Universidad Autónoma de Nayarit.
- Bastida, O. 2012. Métodos de cultivo hidropónico de jitomate, (*Solanum lycopersicum L.*) bajo invernadero basados en doseles escaleriformes (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Chapingo, México. Recuperado de <https://chapingo.mx/horticultura/pdf/tesis/TESISMCH2012112309124791.pdf>

- Bayer, A., Mahbub, I., Chappell, M., Ruter, J., y Iersel, M. W. van. 2013. Water Use and Growth of Hibiscus acetosella 'Panama Red' Grown with a Soil Moisture Sensor-controlled Irrigation System. *HortScience*, 48(8), 980-987.
- Beltrano, J., y Gimenez, D. O. 2015. Cultivo en hidroponía (1era ed.). Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Blum, A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1159-1168. <https://doi.org/10.1071/AR05069>
- Blum, A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Bonachela, S., Fernández, M. D., Cabrera, F. J., y Granados, M. R. 2018. Soil spatio-temporal distribution of water, salts and nutrients in greenhouse, drip-irrigated tomato crops using lysimetry and dielectric methods. *Agricultural Water Management*, 203, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.009>
- Bouroncle, C., Imbach, P., Läderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C., y Fung, E. 2015. La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? Dinamarca: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

- Bramley, H., Turner, N. C., y Siddique, K. H. M. 2013. Water Use Efficiency. En C. Kole (Ed.), *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops*, 2, 25-268. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37048-9_6
- Burnett, S. E., y Iersel, M. W. van. 2008. Morphology and Irrigation Efficiency of *Gaura lindheimeri* Grown with Capacitance Sensor-controlled Irrigation. *HortScience*, 43(5), 1555-1560.
- Buttaro, D., Santamaria, P., Signore, A., Cantore, V., Boari, F., Montesano, F. F., y Parente, A. 2015. Irrigation Management of Greenhouse Tomato and Cucumber Using Tensiometer: Effects on Yield, Quality and Water Use. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 440-444. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.050>
- Camacho-Arce, G. 2017. Evaluación económica para la producción del híbrido de chile dulce (*Capsicum annuum*) «Dulcítico» en invernadero, mediante el enfoque de presupuestos parciales, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica (Tesis, Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Campbell Scientific. 2018. CR1000 - Measurement and Control Datalogger. Recuperado 11 de octubre de 2018, de <https://www.campbellsci.es/cr1000>
- Calvo, L., & Ramírez, R. 2008. Comparación de dos métodos de riego (Temporizador y Bandeja por demanda) en cultivo de Lechuga sembrada en invernadero. *Boletín del programa nacional sectorial de producción agrícola bajo ambientes protegidos.*, Año 2(número 9), 3-4.

Castro Brindis, R. 1992. Respuesta a la aplicación de B-9 y tipo de poda en el cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), en altas densidades de población bajo invernadero en sistema hidropónico (Tesis (Ing. Agr. Esp. en Fitotecnia) -- UACH. Departamento de Fitotecnia). Universidad de Chapingo, México. Recuperado de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UACHBC.xisymethod=postyformato=2ycantidad=1yexpresion=mfn=005724>

Chen, J., Kang, S., Du, T., Qiu, R., Guo, P., y Chen, R. 2013. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 129, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.011>

CIMMY. 1988. La Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. México: CIMMYT.

Cisneros, A. 2003. *Apuntes de la materia de Riego y Drenaje* (p. 164). México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Recuperado de <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego%20y%20Drenaje.pdf>

Colla, G., Roupael, Y., Canaguier, R., Svecova, E., y Cardarelli, M. 2014. Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00448>

- Díaz, G. G., & others. 2004. Hidroponía en casa: una actividad familiar. San José, CR: Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de <http://www.academia.edu/download/32152332/Hidroponia.pdf>
- Drew, M. C. 1997. OXYGEN DEFICIENCY AND ROOT METABOLISM: Injury and Acclimation Under Hypoxia and Anoxia. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48, 223-250. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.223>
- Eckstein, D., Künzel, V., y Schäfer, La. 2018. Índice de Riesgo Climático Global 2018. Alemania: Germanwatch. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania. Recuperado de <https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/publication/20398.pdf>
- Espinoza, A., Morera, A., Mora, D., y Torres, R. 2003. Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas. San Jose: OPS.
- Fanasca, S., Colla, G., Roupael, Y., Saccardo, F., Maiani, G., Venneria, E., y Azzini, E. 2006. Evolution of Nutritional Value of Two Tomato Genotypes Grown in Soilless Culture as Affected by Macrocation Proportions. *HortScience*, 41(7), 1584-1588.
- FAO. 2002. Agua y cultivos: Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. (p. 28). Roma, Italia.: Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/docs/cropsdrops_s.pdf

- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (p. 322). Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FIRA, F. I. en relación con la agricultura. 2016. Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf (p. 36). México: Fideicomisos Instituidos en relación con la agricultura. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf
- Flores, R. V., Barrantes, J. R., y de Desarrollo, G. 1999. Efecto del Cambio Climático en la Agricultura. Experiencias en Costa Rica. San José, Costa Rica.: Instituto Meteorológico Nacional.
- Gallardo, M. 2005. Métodos de control de riego en cultivos en sustrato. Horticultura, 183, 26-31.
- Gallardo, M., Soto, F., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., y Thompson, R. B. 2011. Simulación de la productividad y dinámica del agua y N en cultivo de pimiento bajo invernadero con EU-ROTATE_N. Avances en nuevas estrategias de fertilización, 56, 7-22.
- Gameda, S., Loboguerrero, A. M., Martínez Barón, D., Boa, M., y Flores, R. 2014. Estado del Arte en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria en Costa Rica. San José, Costa Rica.: Ministerio de Agricultura y Gandería.
- Gardner, F. P., Pearce, B., y Mitchell, R. 1990. Physiology of Crop Plants (Edición: 1st). Estados Unidos: Iowa State Pr.

- González, G. A., Ramos, J. J. M., Ramos, J. Z. C., Arredondo, J. L. O., Chávez, L. T., Tapia, P. V., y Reyes, S. E. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DJ2012041299>
- Henderson, S., Gholami, D., y Zheng, Y. 2018. Soil Moisture Sensor-based Systems are Suitable for Monitoring and Controlling Irrigation of Greenhouse Crops. *HortScience*, 53(4), 552-559. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12676-17>
- Horton, D. 1986. Análisis de presupuesto parcial para investigación en papa a nivel de finca. Lima, Perú: CIP.
- Iersel, M. W. V., Dove, S., Kang, J.-G., y Burnett, S. E. 2010. Growth and Water Use of Petunia as Affected by Substrate Water Content and Daily Light Integral. *HortScience*, 45(2), 277-282.
- Iersel, M. W. van, Chappell, M., y Lea-Cox, J. D. 2013. Sensors for Improved Efficiency of Irrigation in Greenhouse and Nursery Production. *HortTechnology*, 23(6), 735-746.
- Incrocci, L., Marzioletti, P., Incrocci, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., ... Pardossi, A. 2014. Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, 131, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.004>

INIA. 2017. Manual de cultivo del tomate bajo invernadero (1.^a ed.). Santiago, Chile.: Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Andrea Torres P. Recuperado de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/12%20Manual%20de%20Tomate%20Invernadero.pdf>

Irrrometer. 2018a. Ficha técnica de opciones de automatización y de salida. Irrrometer company, INC. Recuperado de <http://www.irrometer.com/pdf/Irrrometers/117sp%20Auto%20Output%20Option-WEB.pdf>

Irrrometer. 2018b. Ficha técnica del IRROMETER Modelo LT (Baja Tensión). The irrometer company, INC. Recuperado de <http://www.irrometer.com/pdf/IRROMETERs/109sp-Model%20LT-WEB.pdf>

Juárez-Maldonado, A., de Alba Romenus, K., Zermeño González, A., Ramírez, H., y Benavides Mendoza, A. 2015. Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), 943-954.

Kinet, J. M. 1977. Effect of defoliation and growth substances on the development of the inflorescence in tomato, 6, 27-35.

Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., ... Ozguven, A. I. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 69(3), 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.008>

- Krüger, E., Schmidt, G., y Brückner, U. 1999. Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae*, 81(4), 409-424. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00030-8)
- Kulkarni, M., y Deshpande, U. 2006. Comparative Studies in Stem Anatomy and Morphology in Relation to Drought Resistance in Tomato (*Lycopersicon esculentum*) - SciAlert Responsive Version. *American Journal of Plant Physiology*, 1(1), 82–88. <https://doi.org/10.3923/ajpp.2006.82.88>
- Kuşçu, H., Turhan, A., y Demir, A. O. 2014. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management*, 133, 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.008>
- Lardizabal, R. 2010. Producción en invernaderos. Estados vegetativos y generativos de los cultivos. Honduras: Fintrac. Recuperado de http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/bitstream/handle/123456789/310/EDA_Control%20Vegetativo_%20Generativo%202010%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf?sequence=1
- Litvin, A. G., Iersel, M. W. van, y Malladi, A. 2016. Drought Stress Reduces Stem Elongation and Alters Gibberellin-related Gene Expression during Vegetative Growth of Tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 141(6), 591-597. <https://doi.org/10.21273/JASHS03913-16>

- López, L., & MAG. 2017. Generalidades de la agro cadena de tomate (*Solanum lycopersicum*). Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/estructura/oficinas/prog-nac-tomate.html#HERMES_TABS_1_1
- Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J. R., Valle Paniagua, D. H. del, Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. (2011). Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(5), 659–672.
- Macías-Duarte, R., Grijalva-Contreras, R. L., y Robles-Contreras, F. 2010. efecto de tres volúmenes de agua en la productividad y calidad de tomate bola (*Lycopersicon esculentum* mill.) bajo condiciones de invernadero. *Biotecnia*, 12(2), 11-19. <https://doi.org/10.18633/bt.v12i2.84>
- Marín, F. 2007. Cuantificación y valoración de estructuras y procesos de producción bajo ambientes protegidos en Costa Rica. San José, CR: Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00290.pdf>
- Maroto, V. 2002. Horticultura herbácea especial (3º). Madrid, España.: Mundiprensa. Recuperado de <http://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484760429/horticultura-herbacea-especial>
- Martin, E. C., y Munoz, C. 2017. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego? Cuándo? (Científico) (p. 8). Arizo, Estados Unidos: College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ).

Martin, J. H., y Leonard, W. H. 1949. Principles of field crop production. The Macmillan Company; New York; Collier-Macmillan Limited; London.

Martínez, M. S., Bart, L. C. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (50), 171–186.

Martinez-Guzman, M., y FAO. 2013. Tecnologías para el uso sostenible del agua (p. 70). Honduras: FAO. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/Tecnologias_para_el_uso_sostenible_del_agua.pdf

METER, D. devices. 2018a. Manual de operacion, GS3. METER Group, Inc. USA. Recuperado de http://library.metergroup.com/Manuals/20429_GS3_Web.pdf

METER, D. devices. 2018b. METER Legacy Soil Moisture Sensors. Recuperado 10 de octubre de 2018, de <https://www.metergroup.com/environment/articles/meter-legacy-soil-moisture-sensors/>

Mohammad, F. S., Al-Ghobari, H. M., & El Marazky, M. S. A. 2013. Adoption of an intelligent irrigation scheduling technique and its effect on water use efficiency for tomato crops in arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 7(3), 305.

- Mora, C. D., Ritter, A., Machín, N., Regalado, C. M., y Cid, M. C. 2005. Caracterización hidrológica y curvas de calibración específica del sensor de humedad EC-5 en sustratos de lana de roca y fibra de coco (p. 10). Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA).
- Monge-Pérez, J. E. 2014. Caracterización de 14 genotipos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica. *Tecnología en Marcha* Vol, 27, 58–68.
- Muñoz-Carpena, R., Li, Y. C., Klassen, W., y Dukes, M. D. 2005. Field Comparison of Tensiometer and Granular Matrix Sensor Automatic Drip Irrigation on Tomato. *HortTechnology*, 15(3), 584-590.
- Nemali, K. S., y Iersel, M. W. van. 2008. Physiological Responses to Different Substrate Water Contents: Screening for High Water-use Efficiency in Bedding Plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(3), 333-340.
- Nemali, K. S., Montesano, F., Dove, S. K., y van Iersel, M. W. 2007. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes. *Scientia Horticulturae*, 112(2), 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.013>
- Nuez, F. 1995. *El Cultivo del tomate*. España: Mundi-Prensa.
- Ortega, P. (2015). *Diseño y montaje de un prototipo para el control automatizado del sistema de riego por canales en el Área de Yamburara (Vilcabamba)*

haciendo uso de hardware y software open source (Tesis para título de Ingeniero.). Univeridad Nacional de Loja, Ecuador.

Pardossi, A., y Incrocci, L. 2011. Traditional and New Approaches to Irrigation Scheduling in Vegetable Crops. *HortTechnology*, 21(3), 309-313.

Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P., Bacci, L., ... Balendonck, J. 2009. Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. *Sensors*, 9(4), 2809-2835.
<https://doi.org/10.3390/s90402809>

Passioura, J. B., y Angus, J. F. 2010. Chapter 2 - Improving Productivity of Crops in Water-Limited Environments. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, 106, 37-75. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)06002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)06002-5)

Patanè, C., Tringali, S., y Sortino, O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 590-596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>

Peil, R. M., y Galvez, J. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *Current Agricultural Science and Technology*, 11(1).
<https://doi.org/10.18539/cast.v11i1.1171>

Prasad, K. S. S., Kumar, N., Sinha, N. K., & Saha, P. K. 2012. Water-Saving Irrigation System Based on Automatic Control by Using GSM Technology. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 12(12), 1824–1827.

- Resh, H. 2001. Cultivos hidropónicos. Madrid, España.: Mundi-Prensa.
Recuperado de
[//www.mundiprensa.com/catalogo/9788484760054/cultivos-hidroponicos](http://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484760054/cultivos-hidroponicos)
- Reyes Hernández, M. 2002. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: Re-enseñando el uso de este enfoque. *La Calera*, 2, 40-48.
- Reynolds, M., y Tuberosa, R. 2008. Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(2), 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.02.005>
- Rhie, Y. H., y Kim, J. 2017. Changes in Physical Properties of Various Coir Dust and Perlite Mixes and Their Capacitance Sensor Volumetric Water Content Calibrations. *HortScience*, 52(1), 162-166. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11362-16>
- Rivas, F. A. 2017. Sistema automático de fertirriego adaptable a las necesidades de la agricultura costarricense (Tesis, Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Rodríguez, R. R., Rodríguez, J. M. T., y Juan, J. A. M. S. 1997. Cultivo moderno del tomate (Segunda Edición). España: Mundi-Prensa.
- Rouphael, Y., Colla, G., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., y Rea, E. 2004. Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *The Journal of*

- Horticultural Science and Biotechnology, 79(3), 423-430.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511784>
- Sade, N., Gebretsadik, M., Seligmann, R., Schwartz, A., Wallach, R., y Moshelion, M. 2010. The Role of Tobacco Aquaporin1 in Improving Water Use Efficiency, Hydraulic Conductivity, and Yield Production Under Salt Stress. Plant Physiology, 152(1), 245-254.
<https://doi.org/10.1104/pp.109.145854>
- Sade, N., Vinocur, B. J., Diber, A., Shatil, A., Ronen, G., Nissan, H., ... Moshelion, M. 2009. Improving plant stress tolerance and yield production: is the tonoplast aquaporin SITIP2;2 a key to isohydric to anisohydric conversion? New Phytologist, 181(3), 651-661. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02689.x>
- Segura-Castruita, M. Á., Ramírez-Seañez, A. R., García-Legaspi, G., Preciado-Rangel, P., García-Hernández, J. L., Yescas-Coronado, P., ... Montemayor-Trejo, J. A. 2011. Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pómez con tres diferentes frecuencias de riego. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17, 25-31.
- Sánchez, M. 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile1. *Revisata de Geografía Norte Grande*, 4-8.
- Sánchez-Martínez, M. I. 2000. Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración. Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10432>

Salazar, N. 2013. Cultivo protegido hidropónico del tomate (*Lycopersicon esculentum* mill) utilizando plántulas producidas en celdas de diferente volumen y edad de trasplante en Santa Clara, San Carlos. Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos. Recuperado de [http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3309/CULTIVO%20PROTEGIDO%20HIDROP%
c3%93NICO%20DEL%20TOMATE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3309/CULTIVO%20PROTEGIDO%20HIDROP%c3%93NICO%20DEL%20TOMATE.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Soto, F. 2016, marzo. Métodos de control de Riego. Entrevista personal 2016.

Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 42(2).
Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/33779>

Stępniewski, W., & Przywara, G. 1992. The influence of soil oxygen availability on yield and nutrient uptake (N, P, K, Ca, Mg, Na) by winter rye (*Secale cereale*). *Plant and Soil*, 143(2), 267-274.
<https://doi.org/10.1007/BF00007882>

Thompson, A. J., Andrews, J., Mulholland, B. J., McKee, J. M. T., Hilton, H. W., Horridge, J. S., ... Taylor, I. B. 2007. Overproduction of Abscisic Acid in Tomato Increases Transpiration Efficiency and Root Hydraulic Conductivity and Influences Leaf Expansion. *Plant Physiology*, 143(4), 1905-1917. <https://doi.org/10.1104/pp.106.093559>

Thompson, R. B., Gallardo, M., Valdez, L. C., y Fernández, M. D. 2007a. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil

- water content sensors. *Agricultural Water Management*, 92(1-2), 13-28.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.04.009>
- Thompson, R. B., Gallardo, M., Valdez, L. C., y Fernández, M. D. 2007b. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 147-158.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007>
- Turner, N. C., y Asseng, S. 2005. Productivity, sustainability, and rainfall-use efficiency in Australian rainfed Mediterranean agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1123-1136.
<https://doi.org/10.1071/AR05076>
- Van Der Veken, L., Michels, P., Feyen, J., y Benoit, F. 1982. Optimization of the water application in greenhouse tomatoes by introducing a tensiometer-controlled drip-irrigation system. *Scientia Horticulturae*, 18(1), 9-23.
[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(82\)90097-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(82)90097-8)
- Vargas, J. H. B. 2010. *Curso basico de Hidroponia*. Lulu.com.
- Vartapetian, B. y Jackson, M. 1997. Plant Adaptations to Anaerobic Stress. *Annals of Botany*, 79(suppl 1), 3-20.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a010303>
- Vence, L. B., Valenzuela, O. R., Svartz, H. A., y Conti, M. E. 2013. Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencia del suelo*, 31(2), 153-164.

Viani, F. 2016. Experimental validation of a wireless system for the irrigation management in smart farming applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(9), 2186-2189. <https://doi.org/10.1002/mop.30000>

Westhuizen, V. der, y Jacoba, R. 2009. Irrigation scheduling of tomatoes (*Lycopersicon esculentum Mill.*) and cucumbers (*Cucumis sativus L.*) grown hydroponically in coir (Tesis). Stellenbosch: University of Stellenbosch. Recuperado de <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/1086>

Anexos