



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá**

**Jessica Vargas Cruz**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Área de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2015



# **Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá**

**Jessica Vargas Cruz**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería – Ingeniería Agrícola**

Director:

Ph.D. John Fabio Acuña Caíta

Línea de Investigación:

Adecuación de tierras y desarrollo sostenible

Grupo de Investigación:

GTI - Gestión de Tecnología, Innovación y Diseño Agroindustrial

Universidad Nacional de Colombia.

Facultad de Ingeniería, Área de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2015



*“La felicidad está en buscar la coherencia entre lo que se piensa, lo que se dice y lo que se hace, siempre guiados por lo que tu mente y corazón dicten.”*

- *Jessica Vargas Cruz.*



## **Agradecimientos**

Primero que todo quiero agradecer a Dios y a mi madre Elizabeth Cruz, quien ha sido mi apoyo y fortaleza durante todos mis años de vida, pero en especial en estos dos últimos años siempre estuvo presente apoyándome, dándome aliento y valor, para que nunca dejara de creer en mí y en mis sueños.

A mi director de Tesis el Ingeniero John Fabio Acuña Caita a quien admiro y respeto como profesor, amigo y guía. Le agradezco porque siempre ha estado para apoyarme como profesional y como persona, cada una de sus enseñanzas fueron un pilar importante en el cumplimiento de este sueño hecho realidad.

A mi hermano Hamilton Vargas Cruz por creer en mí y darme la mano cuando lo he necesitado sin importar la distancia siempre estuvo para colaborarme y sorprenderme veces cuando más lo necesitaba.

A mis amigos y mi novio por estar siempre presentes apoyándome y dándome ánimo, sacándome una sonrisa cuando más estresada estaba. Pero en especial al Ingeniero Diego Leonardo Cortez Delgadillo quien un día me animó a hacer esto posible y quien hasta hoy ha sido siempre incondicional.

A los integrantes del Semillero Amaranto y el grupo de investigación GTI de la Universidad Nacional de Colombia, quienes me facilitaron la investigación ayudándome a tomar medidas y preparando todo el montaje. Pero mi más grande agradecimiento es por permitirme compartir y aprender con ellos, para que una que otra vez pudiera aportarles algo de mi conocimiento y aprender de nuevo.

A la empresa Ciplas S.A. y su gerente Johan Murkl, quien donó amablemente para la presente investigación los plásticos de invernadero de última tecnología manejados por su compañía.

Y finalmente, no podría dejar pasar el agradecerle a mi alma mater la Universidad Nacional de Colombia, quien gracias a todas las oportunidades que ofrece a los estudiantes pude realizar mi montaje en el Campus, utilizar sus laboratorios y recibir apoyos económicos por diferentes proyectos en los que se inscribió este trabajo.





## Resumen

Para el presente estudio, se prepararon dos invernaderos con Hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo películas plásticas de diferente porcentaje de difusión de luz, en camas con un suelo rico en materia orgánica con 4 tratamientos de riego (100%, 75%, 50%, 25% de la lámina de riego calculada) en el Campus de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. Se midió en campo en tres momentos del día durante dos meses, el estado de estrés hídrico de la planta por dos métodos tradicionales (conductancia estomática, potencial matricial) y el presentado por imágenes termográficas. Se registró y analizó el comportamiento de algunas de las variables climáticas que influyen en la repuesta de las plantas al déficit de agua y en los métodos utilizados para la detección del estrés hídrico. Se examinaron en laboratorio las características morfológicas según el tratamiento riego, obteniendo la óptima lámina de rendimiento para cada invernadero, y se compararon los métodos tradicionales de detección de estrés hídrico con la temperatura de las hojas obtenida por imágenes termográficas para validar este método, correlacionándolas entre sí y con la normalización dada por el índice de estrés hídrico del cultivo (*CWSI*).

**Palabras clave:** películas plásticas, difusión de la luz, tratamientos de riego, respuesta de las plantas al déficit de agua, variables climáticas, rendimiento del cultivo, índice de estrés hídrico del cultivo (*CWSI*).

## Abstract

For the present study, were get ready two greenhouses with Mint (*Mentha spicata*) under plastic films of different percentage of light diffusion, in beds with a soil rich in organic matter and 4 irrigation treatments (100% prepared, 75%, 50%, 25% of the irrigation depth calculated) on the campus of Bogota headquarters of the National University of Colombia. In field was measured, three times a day, for two months, the state of water stress in the plant by two traditional methods (stomatal conductance, matrix potential) and the method presented by thermographic images. Was recorded and analyzed the behavior of some of the climatic variables that influence the response of plants to water deficit and methods used for the detection of water stress. In Laboratory were examined, according to irrigation treatment, the morphological characteristics by the plants, getting the optimum irrigation depth for each repetition, and were compared the traditional methods of detecting water stress with the temperature of the leaves obtained by thermal images to validate this method, correlating between then and with normalization given by the crop water stress index (CWSI).

**Keywords:** plastic films, diffusion of light, irrigation treatments, Plant response to water deficit, weather variables, crop yield, crop water stress index (CWSI).

## Objetivos e hipótesis

### Objetivo general

- ✓ Evaluar la termografía infrarroja como herramienta potencialmente efectiva para el manejo hídrico del cultivo de Hierbabuena (*Mentha spicata*) en invernadero para la Sabana de Bogotá.

### Objetivos específicos

- ✓ Señalar el efecto de la difusión de la luz producido por las cubiertas de invernadero sobre las condiciones climáticas de producción del cultivo en estudio. (Ta y HR)
- ✓ Demostrar la influencia las condiciones ambientales sobre los requerimientos hídricos de la Hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo cubierta en la sabana de Bogotá.
- ✓ Correlacionar las imágenes termográficas del dosel de la Hierbabuena (*Mentha spicata*) con potencial hídrico del suelo y la conductancia estomática y su relación con el clima.

### Hipótesis

El uso de imágenes termográficas como herramienta de detección de estrés hídrico bajo invernadero es más eficiente para el manejo de riego frente a otras herramientas como el porómetro o medidores de humedad (potencial) del suelo. Ya que tiene en cuenta la relación Agua-planta- ambiente que los otros métodos desprecian y se diferencia en distintos microclimas generados.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Objetivos e hipótesis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de Ilustraciones</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Marco Teórico</b> .....	<b>3</b>
1.1 Capacidad de retención de agua del suelo .....	3
1.2 Estrés hídrico en las plantas .....	4
1.3 Métodos tradicionales en la detección del estrés hídrico en las plantas.....	6
1.3.1 Conductancia estomática ( $g_s$ ).....	6
1.3.2 Potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ).....	7
1.4 Imágenes termográficas (IT) como método de detección de estrés hídrico.....	8
1.4.1 Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI .....	10
<b>2. Metodología</b> .....	<b>13</b>
2.1 Caracterización del área de estudio y diseño del experimento.....	13
2.2 Sometimiento del cultivo a niveles de estrés hídrico (Relación Agua – suelo – planta).....	17
2.2.1 Obtención de curva de retención de humedad CRH y Densidad aparente del suelo $D_a$ .....	17
2.2.2 Selección de los parámetros de riego ( $L_r - F_r - I_a - T_r$ ).....	21
2.3 Detección de estrés hídrico en hierbabuena.....	25
2.3.1 Por medio de la conductancia estomática ( $g_s$ ).....	25
2.3.2 Por medio del potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ).....	26
2.3.3 Por el medio de imágenes termográficas (IT).....	26
2.4 Seguimiento de variables de la relación Planta – Clima.....	28
2.4.1 Temperatura ambiente ( $T_a$ ) y Humedad relativa (HR).....	28
2.4.2 Déficit de presión de vapor (DPV) .....	29

2.4.3	Variables fisiológicas (VF) .....	30
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
3.1.	Validación de las diferencias climáticas entre invernaderos .....	33
3.1.1	Diferencias en las medidas entre el centro del invernadero (C) y a la altura de la planta (Ap).....	33
3.1.2	Diferencias microclimáticas entre R1 y R2.....	36
3.2	Respuesta fisiológica del cultivo de hierbabuena a las variaciones de riego y clima.....	39
3.3	Análisis de la detección de estrés hídrico medido por diferentes métodos tradicionales.....	43
3.3.1	Por conductancia estomática .....	43
3.3.2	Por potencial matricial del suelo .....	47
3.4	Imágenes termográficas como método propuesto para la detección de estrés hídrico.....	52
3.4.1	Comportamiento térmico del cultivo frente a las variaciones de riego. ....	52
3.4.2	Índice de estrés hídrico CWSI.....	58
3.5	Correlación entre los métodos de determinación de estrés hídrico.....	61
3.5.1	Índice CWSI o Td vs conductancia estomática .....	62
3.5.2	Índice CWSI o Td vs potencial matricial del suelo.....	64
3.6	Efecto del clima en medición del estrés hídrico por diferentes métodos. ....	68
3.6.1	Conductancia estomática – Déficit de presión de vapor .....	69
3.6.2	Potencial matricial del suelo – Déficit de presión de vapor .....	71
3.6.3	Temperatura de dosel – Temperatura ambiente – Déficit de presión de vapor .....	73
3.6.4	Índice de estrés hídrico CWSI – Ta - Déficit de presión de vapor.....	78
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>85</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Comportamiento climático de los invernaderos en estudio. Validación de diferencias en condiciones climáticas .....</b>	<b>91</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Ejemplos Salida estadística programa SPSS.....</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>101</b>

## Lista de Ilustraciones

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1-1: Comparación imagen real imagen termográfica del dosel del cultivo. (Fuente: Propia) .....	9
Ilustración 2-1: Vista satelital Campus universitario Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. Ubicación zona experimental (Google Maps 18-02-2015).....	13
Ilustración 2-2: Vista lateral invernadero R1 - SPEKTRA-3 (SP) ® e invernadero R2 - SPEKTRA-3DIF (DIF) ®. (Fuente: propia).....	14
Ilustración 2-3: Vista interior invernadero, adecuado con sistema de riego por goteo. (Fuente: propia).....	16
Ilustración 2-4:(A) Ollas de presión del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. (B) Saturación de muestras. (Fuente: propia) .....	18
Ilustración 2-5: Porómetro de hoja para muestras de conductancia estomática en Hierbabuena Decagon Devices® (Fuente: Propia) .....	25
Ilustración 2-6: A. Sensor WaterMark® enterrado al nivel de las raíces de la planta. B. Estación de humedad WaterMark® Monitor Model 900M Soil Moisture Datalogger (Fuente: Propia.) .....	26
Ilustración 2-7: Cámara termográfica Flir Systems® Modelo A40M. (Fuente: Propia.) ...	27
Ilustración 2-8: Referencia seca (Ts) (Izq.) y referencia húmeda (Tw) (Der.) respectivamente del dosel de hierbabuena (Fuente: Propia).....	27
Ilustración 2-9: Dataloggers Extech instruments ® ubicado a la altura de la planta. (Fuente: Propia.) .....	29
Ilustración 2-10: Imagen fotográfica de las hojas de tratamiento T4 de R1 para análisis de área foliar. (Fuente: Propia.).....	30
Ilustración 2-11: Medición de la altura de la planta. (Fuente: Propia.).....	31
Ilustración 2-12: Lectura de la masa fresca (Izq.) y la masa seca (Der.). (Fuente: Propia.) .....	31

---

Ilustración 3-1: Diferencia de temperaturas a las 9 de la mañana entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.) .....	38
Ilustración 3-2: Diferencia de temperaturas a las 12 del medio día entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.) .....	38
Ilustración 3-3: Diferencia de temperaturas a las 3 de la tarde entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.) .....	38
Ilustración 3-4: A. Imagen fotográfica de la hierbabuena, B. Imagen termográfica a la 9 de la mañana, C. Imagen termográfica 12 del mediodía, D. Imagen termográfica 3 de la tarde. Tratamiento T1 en R2. (Fuente: Propia.).....	53
Ilustración 3-5: Diferencias entre los tratamientos para las temperaturas medias del dosel (Td) medidas a las 12 del mediodía en el invernadero R2. (Fuente: Propia) .....	58



## Lista de figuras

Figura 2-1: Curva de Retención de Humedad del Suelo (CRH) sin ajuste. ....	19
Figura 2-2: Curva de Retención de Humedad del Suelo (CRH) con ajuste al modelo Van Genuchten – Mualem en el programa RECT®. ....	20
Figura 3-1: Temperaturas promedio a la altura de la planta Ap y en el centro C del invernadero R1. ....	34
Figura 3-2: Humedad relativa promedio a la altura de la planta Ap y en el centro C del invernadero R2. ....	34
Figura 3-3: Comportamiento de Ta en R1 y R2 en el centro del invernadero C. ....	36
Figura 3-4: Comportamiento de HR en R1 y R2 la altura de la planta Ap. ....	37
Figura 3-5: Comportamiento de las variables fisiológicas para R1 y R2. ....	40
Figura 3-6: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 9 de la mañana. ....	44
Figura 3-7: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 12 del mediodía. ....	45
Figura 3-8: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 3 de la tarde. ....	45
Figura 3-9: Potencial Matricial para las R1 y R2 registradas a las 9 de la mañana. ....	48
Figura 3-10: Potencial Matricial para R1 y R2 registradas a las 12 del medio día. ....	49
Figura 3-11: Potencial Matricial para R1 y R2 registradas a las 3 de la tarde. ....	50
Figura 3-12: Temperatura del dosel para R1 y R2 a las 9 de la mañana. ....	54
Figura 3-13: Temperatura del dosel para R1 y R2 registradas a las 12 del mediodía. ....	56
Figura 3-14: Temperatura del dosel para R1 y R2 a las 12 del mediodía. ....	57
Figura 3-15: Índice de estrés hídrico CWSI en ambas invernaderos a diferentes horas del día. ....	60
Figura 3-16: Relación índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs, conductancia estomática $g_s$ . ....	62
Figura 3-17: Relación conductancia estomática $g_s$ VS, Temperatura del dosel Td. ....	63

---

Figura 3-18: Relación índice de estrés hídrico del cultivo Vs. Potencial matricial del suelo $\Psi_{ms}$ .....	65
Figura 3-19: Relación temperatura del dosel $T_d$ Vs, potencial matricial $\Psi_{ms}$ .....	67
Figura 3-20: Conductancia estomática Vs. Déficit de presión de vapor en los dos invernaderos R1 y R2. ....	69
Figura 3-21: Déficit de presión de vapor Vs. Potencial matricial para ambas repeticiones .....	72
Figura 3-22: Temperatura ambiente Vs. Temperatura del dosel para ambas repeticiones. ....	73
Figura 3-23: Temperatura del dosel Vs. Déficit de presión de vapor para ambas repeticiones. ....	76
Figura 3-24: Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs. Temperatura del ambiente $T_a$ para ambas repeticiones.....	79
Figura 3-25: Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs. Déficit de presión de vapor DPV para ambas repeticiones.....	81

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 2-1: Especificaciones y comparación de las características de los plásticos Spektra-3 y Spektra-3-DIF con un plástico común.....	15
Tabla 2-2: Composición química fertilizante líquido AGROFEED AGRVIV.00 ® .....	15
Tabla 2-3: Tratamientos de riego del proyecto según en tiempo de riego.....	24
Tabla 3-1: Comparación de la respuesta fisiológica en la repetición uno R1 de los tratamientos de riego T1 y T2.....	41
Tabla 3-2: Comparación de la respuesta fisiológica en la repetición dos R2 de los tratamientos de riego.....	42
Tabla 3-3: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta gs de los tratamientos de riego.....	70
Tabla 3-4: Índices de correlación lineal de Pearson entre y los la respuesta de los tratamientos de riego.....	72
Tabla 3-5: Índices de correlación lineal de Pearson entre Ta y los la respuesta Td de los tratamientos de riego.....	74
Tabla 3-6: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta Td de los tratamientos de riego.....	77
Tabla 3-7: Índices de correlación lineal de Pearson entre Ta y los la respuesta CWSI de los tratamientos de riego. ....	79
Tabla 3-8: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta CWSI de los tratamientos de riego. ....	82



# Introducción

En los últimos años en Colombia se ha aumentado considerablemente el potencial de comercialización de los cultivos de hierbas aromáticas. Según la FAO (2012), se exportan anualmente cerca de 1.200 toneladas de albahaca, hierbabuena, tomillo y romero, principalmente a Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea. Por esta razón, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural ha evidenciado la necesidad de impulsar proyectos de investigación que permitan aumentar el número de hectáreas sembradas en el país, con altos estándares de calidad, mejor rentabilidad en el negocio y fácil acceso a los mercados internacionales (Giraldo y Martin, 2012).

En el caso de la hierbabuena (*Mentha spicata*) se reportan cultivos en el país desde 1998, principalmente en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cesar, Cundinamarca, Huila, Tolima y Valle del Cauca (Díaz, 2003). Sin embargo, presenta varios problemas de manejo agronómico por sus necesidades ecofisiológicas, edafológicas y climáticas, con un alto grado de sensibilidad al encharcamiento (Cuervo, 2012). Esta especificidad de oferta hídrica implica un control detallado del caudal de aplicación, presentándose como un problema en grandes extensiones de cultivo.

La hierbabuena es una de las hierbas aromáticas más comercializadas en Colombia, sensible al déficit de agua y la saturación. Esta desventaja implica costos económicos y ambientales, ya que el exceso de uso de agua produce la degradación de suelo y el desperdicio de este recurso vital. Tener un control de las necesidades hídricas y climáticas de este cultivo, permite lograr su máximo rendimiento de producción, mejorando la relación costo/beneficio para los productores.

Actualmente, un modo de administración del recurso agua en diferentes cultivos consiste en tener un control permanente del estado hídrico de la planta a través de la transpiración, usando la porimetría, que permite caracterizar el estrés hídrico midiendo la apertura de los estomas de las hojas de las plantas una a una, lo que la convierte en una técnica ardua y engorrosa en grandes extensiones de cultivo (Mcainsh *et al*, 2002).

En relación a la detección de estrés hídrico de un cultivo, la termografía en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta muy útil en lo que hoy *conocemos* como

Agricultura de Precisión, teniendo en cuenta que permite el análisis de grandes áreas de dosel, siendo más eficaz que la porimetría en la predicción del rendimiento y la precisión del riego. Por esta razón, un riego por goteo manejado por imágenes termográficas en un ambiente controlado y un monitoreo constante de estrés hídrico en la planta, suena como una alternativa viable para el manejo de cultivos de hierbas aromáticas.

Por medio de imágenes termográficas se obtiene una imagen del dosel de la planta que presenta la información de la temperatura de las hojas, que puede ser normalizada a través del índice de estrés hídrico (Crop Water Stress Index CWSI), el cual es un indicador de cuándo y cuánto se debe regar, y el nivel de estrés hídrico al que está sometida la planta por recurso agua. (Wang *et al*, 2010). (O'Shaughnessy *et al*, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo busca encontrar la aplicación de la termografía infrarroja como herramienta de medición y apoyo en la toma de decisiones para el manejo óptimo del recurso hídrico, teniendo en cuenta la relación agua-suelo-planta-ambiente.

# 1. Marco Teórico

## 1.1 Capacidad de retención de agua del suelo

El suelo es el medio más importante de desarrollo de las plantas de un cultivo como medio de sostén y depósito de agua disponible para las mismas. El conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo es indispensable para resolver muchos problemas de manejo de agua en la agricultura y la ecología. Estas propiedades hidráulicas son factores clave que regulan el movimiento de las aguas subterráneas y el transporte de solutos. Entre las propiedades más destacadas se encuentran la conductividad hidráulica saturada ( $k_s$ ) y la curva de retención de humedad del suelo (CRHS) que como su nombre lo indica, es la capacidad de retener agua por el suelo (Shwetha *et al.*, 2015).

La distribución y tamaño de las partículas que conforman el suelo, así como la distribución de los espacios vacíos entre las mismas, son propiedades que inciden en su capacidad de transportar o retener agua. La relación entre estos parámetros no es lineal y determina las denominadas “Curvas características de retención de humedad del suelo” (CRHS), consideradas como la relación entre el contenido volumétrico o grado de saturación en función de la succión que es característica de cada suelo, y cuya forma depende de la estructura del suelo y de la geometría y distribución de los tamaños de los poros. (Ganjian, 2003)

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo se definen como adhesión, cohesión y capilaridad. El fenómeno de adhesión ocurre cuando láminas moleculares de agua se ponen en contacto con partículas del suelo, el de cohesión cuando las láminas de agua se unen a las láminas adheridas y el de capilaridad cuando las láminas cohesionadas encuentran los capilares (poros) del suelo. Estas fuerzas según el tipo de suelo, definen el agua disponible para las plantas entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), puntos que se pueden determinar y predecir a partir de la curva (CRHS) (Barbour, 1998) y se pueden obtener en el laboratorio a partir del método de olla de presión. Este método está basado en medir la relación entre

la tensión y el contenido de humedad del suelo, y consiste en aplicar aire a presiones (inverso de la tensión) variables a las muestras de suelo previamente saturadas

## 1.2 Estrés hídrico en las plantas

El estrés hídrico por déficit de agua es una de las principales causas de muerte en las plantas y ocurre cuando la transpiración excede el agua absorbida por las raíces. Cuando este déficit hídrico se presenta lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Potters *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2008). Uno de los principales mecanismos de resistencia a nivel fisiológico por parte de las plantas es el cierre parcial o total de estomas. Que son las estructuras responsables de la mayor proporción de pérdida de agua en las plantas en el proceso de transpiración de las mismas (Taiz y Zeiger, 2006), y regulan el intercambio gaseoso necesario en la fotosíntesis, la temperatura del dosel y la necesidad de adsorción de agua.

Las plantas adquieren agua del suelo y el CO<sub>2</sub> de la atmósfera para apoyar la fotosíntesis. Esto se logra mediante absorción CO<sub>2</sub> a través de los poros de estomas en el que se transpira simultáneamente agua. Los estomas generalmente responden a tres mecanismos principales: (1) la respuesta directa de los estomas a factores meteorológicos, incluyendo el déficit de presión de vapor (DPV), la temperatura del aire ambiente, la radiación solar y velocidad del viento ( Hetherington y Woodward, 2003 ), (2) una respuesta al déficit hídrico del suelo principalmente a través de la hormona ácido abscísico (Schulze, 1986 ), y (3) los cambios en el estado del agua mesófilo causada por una señal eléctrica (Gram *et al.*, 2007 ). El cierre de los estomas conduce a una reducción en la absorción CO<sub>2</sub> y en la transpiración un aumento de temperatura de la planta (Monteith, 1995). Como resultado, el aumento de la temperatura del dosel es un indicador del estado hídrico en la planta. Esta disminución en la conductancia estomática reduce la transpiración, lo que reduce el enfriamiento por evaporación que aumenta la temperatura de las hojas.

Respecto a estos factores meteorológicos, la sensibilidad de la conductancia estomática al déficit de presión de vapor DPV depende del cultivo y de la especie. El déficit de presión de vapor DPV es la cantidad de vapor de agua que se necesita en un determinado momento para saturar la atmósfera. Es decir, es la diferencia entre la cantidad de vapor



de agua que puede retener la atmósfera y la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera en ese momento (Hargreaves, 1994). El déficit de presión de vapor DPV es de suma importancia para la transpiración de las plantas. A un DPV elevado las plantas liberaran vapor de agua a través de las estomas (transpiración). Sin embargo, a un DPV muy elevado las plantas reaccionan cerrando las estomas con el fin de evitar una excesiva pérdida o deshidratación por transpiración, afectando así la fotosíntesis y el rendimiento (Allen *et al*, 1998). Por otro lado, un valor de DVP cercano a cero las plantas dejan de transpirar, debido a que la atmósfera se encuentra saturada con vapor de agua. Es decir, no hay un gradiente de concentración hacia donde difunda el vapor de los estomas, por lo que se reduce la fotosíntesis y con ello repercute en el rendimiento (Itenfisu *et al*, 2003).

Los estomas constan de dos grandes células denominadas guarda y oclusivas, rodeadas de células acompañantes. Cuando las células guarda reciben suficiente cantidad de agua se dilatan y producen la apertura del estomática. Cuando el suministro de agua es insuficiente el estoma se cerrará y cuanto más cerrado esté, mayor grado de resistencia presentará la planta a la pérdida de agua. Las respuestas estomáticas a la deshidratación en la hoja pueden variar mucho entre especies, incluso dentro de una misma especie dada la autonomía de las mismas frente a las condiciones ambientales de desarrollo (García *et al*, 2006).

En el proceso de transpiración se cumplen dos procesos esenciales: primero se crea una corriente transmigraoria que permite el transporte de nutrientes desde las raíces hasta las partes de la planta en crecimiento. Segundo se enfrían las hojas cuando la temperatura es elevada o hay una fuerte intensidad luminosa, es decir, los estomas favorecen una regulación térmica (Sánchez-Díaz y Aguirreolea 2000). Sin embargo, estos procesos según varios autores interfieren con la necesidad de las plantas para tomar el CO<sub>2</sub> necesario para realizar la fotosíntesis.

No obstante, la habilidad de las plantas para controlar la abertura estomática les permite responder de una forma rápida a los cambios en el medio ambiente. Por ejemplo prevenir una pérdida excesiva de agua e incluso en presencia de abundante agua, las plantas ponen en marcha una regulación temporal de los estomas para limitar las pérdidas de agua durante el proceso de absorción de CO<sub>2</sub>. Es decir, los estomas se abren durante el día y se cierran durante la noche para prevenir pérdidas innecesarias de agua, ya que durante este periodo no se produce fotosíntesis y no hay demanda de CO<sub>2</sub> (Hernández, 2013).

En el cierre estomático por déficit hídrico se pueden distinguir dos fases: una etapa inicial, donde el cierre estomático no interviene ningún proceso fisiológico, sino que se debe a un proceso físico. En este el aire muy seco provoca pérdidas muy rápidas de agua de la epidermis, lo que hace que disminuya el contenido hídrico relativo de la hoja y de las células oclusivas, provocando así el cierre estomático. Y la etapa avanzada, que se trata del cierre hidroactivo de los estomas, estando la planta sometida a un mayor grado de deshidratación. Si el estrés hídrico persiste, se pierde la regulación de la apertura y el cierre de los estomas, si estos quedan abiertos continuamente, se favorecen las pérdidas excesivas de agua y la muerte de la planta. (Buchanam, Gruissem y Jones, 2000).

### **1.3 Métodos tradicionales en la detección del estrés hídrico en las plantas**

El estrés hídrico de las plantas provocado por las sequías puede ser minimizado cuando el riego está disponible. Para una gestión eficiente de las prácticas de riego es necesario saber cuándo el estrés hídrico de la planta comienza y la cantidad de agua que se debe aplicar. Un método ideal para cumplir este proceso es aquel que identifique el inicio del estrés hídrico de la planta y tenga en cuenta información sobre la totalidad del conjunto suelo-planta-atmósfera respecto a la transferencia de agua. (Durigon A. y Jong van Lier Q, 2013)

Sin embargo, el estrés hídrico de la planta se determina generalmente sobre las mediciones realizadas en las sub partes del conjunto suelo-planta-atmósfera, como es el caso cuando la evaluación del estrés se basa en mediciones de la humedad del suelo o el potencial hídrico de la planta o en la demanda de agua atmosférica (Monteiro *et al*, 2012). Respecto a estos métodos se encuentran la determinación de estrés por medición de la conductancia estomática ( $g_s$ ) y según la disponibilidad de agua midiendo el potencial matricial ( $\Psi_{ms}$ ).

#### **1.3.1 Conductancia estomática ( $g_s$ )**

Muchos investigadores han realizado un gran número de estudios sobre los estomas, en especial el comportamiento de estos en relación a los factores ambientales (Mediavilla y

Escudero, 2003). Para realizar estos estudios se concentraron en la reacción que tiene la planta a su medio ambiente de desarrollo en las hojas, controlando la apertura y cierre de estomas según sus necesidades, lo que conocemos como conductancia estomática ( $g_s$ ) (Johnson *et al*, 2005). Esta es una variable muy importante para evaluar el estado hídrico de la planta, el balance de energía y las relaciones fotosintéticas (Vico *et al*, 2013) Zhu *et al*. 2015; Huntingford *et al*, 2015). Se ha comprobado la estrecha relación que existe en muchos cultivos entre el cierre estomático y la falta de agua en el suelo, haciendo de la ( $g_s$ ) por sí misma un indicador del estrés hídrico mucho más preciso que los parámetros utilizados habitualmente (Daryl *et al*, 2014).

Generalmente, los valores de conductancia se obtienen con la ayuda de porómetros, empleando diferentes técnicas. El porómetro mide la conductividad estomática de las hojas usando la técnica del Estado Estacionario. Esta técnica mide la presión de vapor y el flujo de vapor sobre la superficie de la hoja. La pinza del porómetro, que incorpora una cámara con un recorrido de difusión conocido, se fija a la superficie de las hojas y a continuación se empieza a medir la presión de vapor entre dos puntos de esta trayectoria. Lo que permite calcular el flujo y el gradiente con las medidas de presión de vapor y conductancia de difusión conocida (Mcainsh *et al*, 2002). Sin embargo, la técnica de la promecía es realmente ardua dado que una sola medida de mínimo 30 segundos por hoja o por planta no es suficiente para dar un veredicto final del estado hídrico de grandes extensiones de cultivo.

### 1.3.2 Potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ )

En Colombia no se reportan trabajos sobre mediciones del consumo de agua para el cultivo de hierbabuena, ni tampoco estudios que hayan determinado la frecuencia, duración y eficiencia de los riegos, aunque sí para otras especies aromáticas como la albahaca (*Ocimum basilicum*) y la Mentha (Martínez-Bernal, 2009; Patiño y Urrea, 2003). Una de las labores importantes en el manejo en este tipo de cultivos en el riego, se presenta por la alta susceptibilidad al déficit y encharcamiento de agua (Cuervo, 2012). Dicho manejo, junto a otros componentes del riego se determinan de acuerdo con las condiciones del agua en el suelo del cultivo (Palacios, 2002).

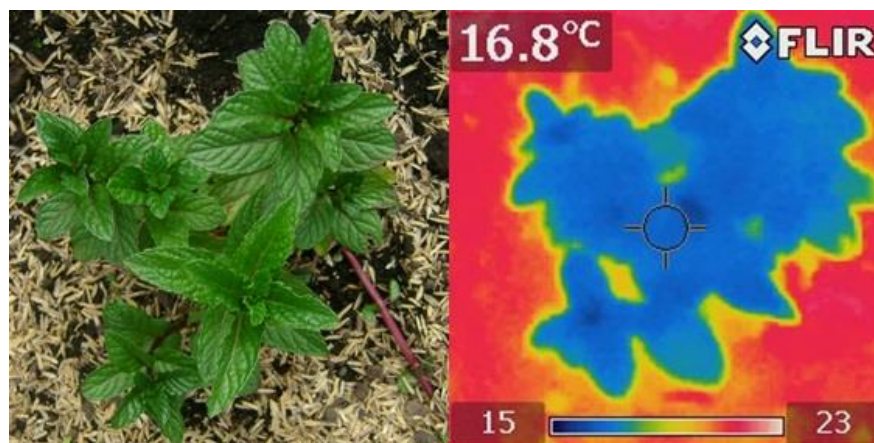
Una de esas condiciones más relevantes en el suelo del cultivo es la energía con que se encuentra retenida el agua por las partículas o matriz del suelo, conocida como potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) (Torrente, 2009). Este potencial está influenciado entre otros

factores por la textura, la estructura, la porosidad, y la profundidad del suelo (Brady y Weil, 2002), y su aumento limita la absorción radical y por tanto la reducción en el crecimiento vegetal (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2000). Este potencial, medido en unidades de presión (bares, pascales, atmosferas, etc.) se considera particularmente en áreas no salinas como el mejor criterio para la caracterización de la disponibilidad de agua en el suelo, respecto a los contenidos volumétricos o gravimétricos (Xing-Wang *et al.*, 2007). Según Wang *et al.*, (2007) en el monitoreo del ( $\Psi_{ms}$ ), la precipitación y la evaporación para los cultivos no requieran ser medidas, al igual que minimiza las pérdidas por percolación mediante la elección adecuada de las descargas hídricas. Para dicho monitoreo entre otros instrumentos, se utiliza el tensiómetro, consistente en una cápsula porosa de material cerámico, a través de la cual se realiza una succión cuando el agua dentro de la cerámica entra en contacto hidráulico y tiende a equilibrarse con el agua del suelo (Gurovich, 2009). Rangos de tensión matricial entre 0 y 10 cb indican suelo saturado; entre 10 y 20 cb, capacidad de campo; desde 30 a 60 cb, inicio del riego; y tensiones mayores a 70 cb reflejan la poca disponibilidad de agua para las plantas (Fuentes y García, 1999). Además, si se colocan tensiómetros a diversas profundidades, es posible regular la aplicación del agua -cuándo y cuánto regar- con relación al estado de humedad que existe a diferentes niveles de profundidad del suelo (Gurovich, 2009). Cuando el tensiómetro es instalado superficialmente, es decir sobre el volumen radical de la planta, indicará cuándo regar, mientras que si es instalado dentro de la masa radical, indicará cuánto regar (Palacios, 2002).

## **1.4 Imágenes termográficas (IT) como método de detección de estrés hídrico**

Las mediciones del estrés hídrico de origen vegetal proporcionan una visión más directa del estado de la planta que los fundamentados en las condiciones del suelo o de la atmósfera. Por otro lado, los métodos de programación de riego por monitoreo de la planta son cada vez más aceptadas por agrometeorólogos e hidrólogos (Naor, 2008). La temperatura de la cubierta, medida por la termometría de infrarrojos, proporciona una técnica de monitorización de la planta no invasivo o no destructivo, que se puede realizar de forma automática a alta resolución de tiempo (Cohen *et al.*, 2005).

La termografía infrarroja es una técnica que permite medir la temperatura de un objeto a distancia sin la necesidad de que exista un contacto físico. Su principio de funcionamiento se basa en que todos los cuerpos objeto deben tener una temperatura superior al cero absoluto (0 °K, -273 °C); emitiendo así energía infrarroja que se convierte en una señal eléctrica que es captada por un detector. (Ejemplo: una cámara termográfica). Este detecta la energía infrarroja invisible que emiten los objetos y la transforma en una imagen termográfica (Ilustración 1-1) (visión artificial), de la cual se puede obtener información directa del objeto en el momento o se puede correlacionar con una variable de análisis (Villa *et al.* 2011) y (Belin *et al.*, 2011).



**Ilustración 1-1: Comparación imagen real imagen termográfica del dosel del cultivo. (Fuente: Propia)**

El manejo y control de la temperatura de las hojas es clave en muchos aspectos del desarrollo funcional de las plantas, (Jones, 1990). Su importancia en las relaciones hídricas del cultivo comenzó a ser reconocida en el siglo XX, donde se utilizó inicialmente en 1960 para la programación del riego a través de pruebas de censado de temperatura del dosel. Luego, en 1980 mediante imágenes infrarrojas de satélite se pudo detectar las necesidades hídricas de cultivos, siendo más específico Mahey en 1991, quien detectó el estrés hídrico de la planta como un indicador clave de las necesidades de agua del cultivo (Leuzinger *et al.*, 2007).

Igualmente, según Best *et al.*, (2009), las primeras investigaciones asociadas a la termografía infrarroja para la detección de estrés hídrico se dieron el 1981, las cuales se concentraron en mediciones de la temperatura del dosel usando sensores manuales que generaban limitaciones por los equipos existentes en ese momento. En consecuencia, la

Temperatura del Dosel (TC) hoy por hoy es reconocida por está relación con el estado hídrico de las plantas y el cierre estomático de las hojas. De ahí que, varios estudios han encontrado que existen significativas correlaciones entre el índice estrés hídrico medido a partir de equipos científicos de medición y el determinado por termografía infrarroja (Padhi *et al*, 2012).

Actualmente en la agricultura, el uso de la termografía infrarroja es útil en muchos aspectos como: aplicación precisa de herbicidas, control de malezas, infecciones bacterianas, fúngicas, virales, reconocimiento del dosel, nutrientes del suelo y su fertilidad, detección de enfermedades foliares, estado hídrico del cultivo, estimación del número de frutos en los cultivos por surcos, entre otros aspectos. Convirtiéndose en una técnica de gran utilidad para la toma de decisiones en la aplicación o manejo de algunas prácticas con base al estado de la planta. Estimando factores de la producción de forma precisa, no destructiva y en tiempo actual con alto impacto económico. (Davis *et al*, 2010)

De ahí que, varios estudios han encontrado que existen significativas correlaciones entre el índice estrés hídrico del cultivo medido a partir de equipos científicos de medición y el determinado por termografía infrarroja. La estrecha relación entre el cierre estomático y la temperatura del dosel, con déficit de agua, fisiológicamente está explicada en el hecho de que un significativo y consecuente cierre estomático ocurrido en plantas sometidas a un estrés hídrico, lleva a la disipación de energía por transpiración que se reduce sustancialmente y de tal manera que la temperatura de la hoja tiende a aumentar. (Best *et al*, 2009). Sin embargo, las plantas que no presentan estrés hídrico tienen temperaturas de dosel menores de la temperatura del aire, en particular cuando el déficit de presión de vapor no es mayor que 4 kPa (Olivo *et al*, 2009 citado por Wang *et al*, 2010).

#### **1.4.1 Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI**

En relación a la detección de estrés hídrico de un cultivo, la termografía en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta muy útil en lo que hoy conocemos como Agricultura de Precisión. Por medio de la termografía, se obtiene una imagen del dosel de la planta, de la cual se extrae, a través de técnicas de identificación de colores simples, el área de las hojas y la distribución de la temperatura en las mismas, desde las hojas más húmedas hasta las hojas más secas. Obteniendo así, el índice de estrés hídrico (Crop

Water Stress Index CWSI) el cual ha sido un indicador en diferentes investigaciones de cuándo y cuánto se debe regar la planta. De tal modo, la correlación de este indicador con la técnica termográfica permite encontrar, a partir de la temperatura media del dosel medida, el nivel de estrés hídrico al cual está sometida la planta por un mal manejo del recurso agua. (Wang *et al*, 2010). (O'Shaughnessy *et al*, 2011)

Durante varios años de estudio, se han propuesto varios índices para transformar o normalizar los datos de temperatura del dosel respecto a la información sobre el estado hídrico de la planta. Entre ellos, el más común es el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) que se basa en las diferencias de temperatura del dosel respecto al aire. El CWSI puede determinarse a partir de dos enfoques: el primero un enfoque empírico propuesto por Idso *et al.* (1981) que se centra en la relación entre la diferencia de temperatura del dosel al aire ( $T_d - T_a$ ) y el déficit de presión de vapor del aire (DPV) y el segundo, se calcula basándose en el conocimiento de la temperatura de la cubierta vegetal media ( $T_d$ ) y las temperaturas de las hojas de referencia secas ( $T_s$ ) y húmedas ( $T_w$ ) (Jones, 1999).

En la actualidad en Colombia, el uso eficiente del agua para cultivos se viene estudiando a través de métodos como el Riego Deficitario Controlado RDC. Sin embargo, la aplicación de imágenes termográficas para determinación de estrés hídrico en cultivos no se ha desarrollado, haciéndose necesario generar datos que permitan definir la eficiencia y efectividad de este método como ayuda a la toma de decisiones sobre el manejo eficiente del recurso.





## 2. Metodología.

### 2.1 Caracterización del área de estudio y diseño del experimento.

Este estudio se desarrolló en el campus de la Universidad Nacional de Colombia ubicado en la ciudad de Bogotá (Cundinamarca – Colombia), situada a 4°38'8" latitud norte, 74°4'58" longitud oeste y a una elevación de 2650 msnm. En los últimos años la Sabana se ha caracterizado por tener una temperatura promedio de 14 °C, que puede oscilar entre los 9 °C y los 22 °C según el IDEAM (2014), valores que se alteran en las temporadas secas y lluviosas a lo largo del año debido a los fenómenos de El Niño y La Niña, que se dan en la cuenca del Pacífico y producen cambios climáticos muy fuertes. Dentro del Campus Universitario se ubicaron en la zona de invernaderos dos unidades experimentales (dos ambientes con diferentes respuestas R1 y R2). Su ubicación exacta se puede observar desde una vista satelital en la ilustración 2-1.

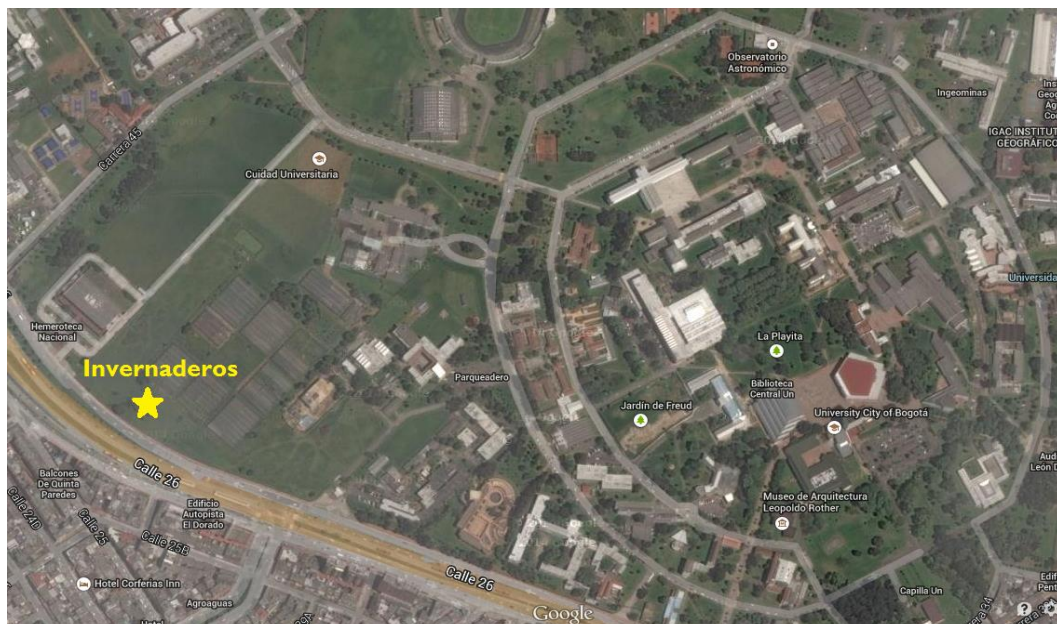


Ilustración 2-1: Vista satelital Campus universitario Universidad Nacional de Colombia- Sede Bogotá. Ubicación zona experimental (Google Maps 18-02-2015).

14 Implementación de imágenes para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá

---

Para el presente ensayo se utilizaron dos unidades experimentales (invernaderos) cada una de 27 m<sup>2</sup> de área, con una altura de 1,8 m hasta las aperturas laterales y 3 m hasta la apertura cenital. Para su diseño estructural se utilizaron columnas de guadua y cerchas en madera tradicional, teniendo en cuenta una apertura cenital y lateral de 0,2 m de alto que son la única área de ventilación natural (Ilustración 2-2).



**Ilustración 2-2: Vista lateral invernadero R1 - SPEKTRA-3 (SP) ® e invernadero R2 - SPEKTRA-3DIF (DIF) ®. (Fuente: propia).**

Los invernaderos se adecuaron con dos distintos tipos de cubierta plástica: invernadero uno R1 SPEKTRA-3 (SP) ® e invernadero dos R2 - SPEKTRA-3DIF (DIF) ®. Lo que proporcionó dos microambientes (dos condiciones distintas) en la misma zona de estudio para la especie analizada. Según el fabricante, ambas cubiertas tienen las mismas propiedades mecánicas, de termicidad y tramitancia de luz en la región PAR (Tabla 2-1). Sin embargo, el plástico SPEKTRA-3DIF® tiene un 82% de difusión de la luz frente a un 35% de SPEKTRA-3®.

**Tabla 2-1: Especificaciones y comparación de las características de los plásticos SPEKTRA-3 y SPEKTRA-3-DIF con un plástico común (Ciplas S.A.S)**

Referencia		Spektra-3		Spektra-3-DIF		Película 6 md		Pruebas realizadas		
Propiedades	Norma	Medida	Long	tras	Long	tras	Long	tras	Donde	Cuando
Masa por área	ISO 3801, Método 5	g/m <sup>2</sup>	100		100		145		Ciplas	27/02/2014
Resistencia a la tensión	ISO 13934-1	N	500	510	500	510	228	270	Ciplas	27/02/2014
Elongación a la rotura	ISO 13934-1	%	26	26	26	26	>100%	>100%	Ciplas	27/02/2014
Resistencia al rasgado	ISO 6383-1	N	147		147		18,62		Uniandes	16/08/2013
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 4833	N	258		258		61		Uniandes	8/08/2013
Resistencia UV, QVB (1)	ASTM G-154	horas	800		800		400		Ciplas	15/12/2013
Tramitancia de luz	ASTM D 1003	%	79		79		86		Pelex	28/02/2014
Difusión de luz	ASTM D 1003	%	35		82		25		Pelex	28/02/2014
Termicidad	ASTM D 5576	%	84%		84%		30%		Uniandes	23/01/2014
Barrera 7-13 µm	EN 13206									

En cada invernadero hubo 4 tratamientos, cada uno definido como cama doble de 2.3 m de largo por 0.6 m de ancho. En cada cama doble (1.2 m de ancho en total) se sembraron plantas de hierbabuena, a 0.2m de separación entre líneas y 0,2 m entre plantas para un total de 40 plantas (10% de plántulas perdidas en el trasplante) por cama doble y tratamiento, con suelo rico en materia orgánica y una capa de cascarilla de arroz para evitar la evaporación del agua en el suelo. Se fertilizó según las recomendaciones para el cultivo en estudio: dos veces al mes con un fertilizante líquido AGROFEED AGRVIV.00® el cual contiene microelementos 100% quelatados con DTPA y la dosificación recomendada debe ser de 5.0 l/m<sup>3</sup> solución final. La composición química de este fertilizante se aprecia en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2: Composición química fertilizante líquido AGROFEED AGRVIV.00®**

N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	B	Mo	Ácidos Fulvicos
(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
200	30	220	130	18	0,5	0,2	0,2	2	0,3	.0,1	10



16 Implementación de imágenes para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá

---

El material vegetal utilizado fue hierbabuena (*Mentha spicata*) la cual según Orellana (2013), puede medir de 0,2 a 0,45 m de alto, con tallos cuadrangulares largos y hojas ovaladas opuestas. Del mismo modo, según varios registros bibliográficos, al igual que toda el género de *Menthas* tiene un buen desarrollo en climas templados a templados cálidos, con elevada luminosidad. Esto es importante debido a que aumenta el contenido de mentol en el aceite esencial (Arizo, Curioni y Motta 2008). Para el comienzo de la brotación necesita temperaturas entre 2 y 5°C y la temperatura óptima para el crecimiento, desarrollo y acumulación de aceites esenciales es de 20 a 25 °C (Curioni y Arizio, 2006). Las temperaturas diurnas de 30°C favorecen la máxima producción de materia seca de hojas, tallos y raíces con independencia de las temperaturas nocturnas (Alonso, 2004). La floración se ve restringida con una combinación de altas temperaturas diurnas y bajas nocturnas. Además en condiciones de campo en esta etapa se manifiesta la mayor producción de aceites esenciales. Esto último no se exterioriza bajo condiciones de temperaturas extremas (Arizo, Curioni y Motta 2008).



**Ilustración 2-3: Vista interior invernadero, adecuado con sistema de riego por goteo. (Fuente: propia)**

## **2.2 Sometimiento del cultivo a niveles de estrés hídrico (Relación Agua – suelo – planta)**

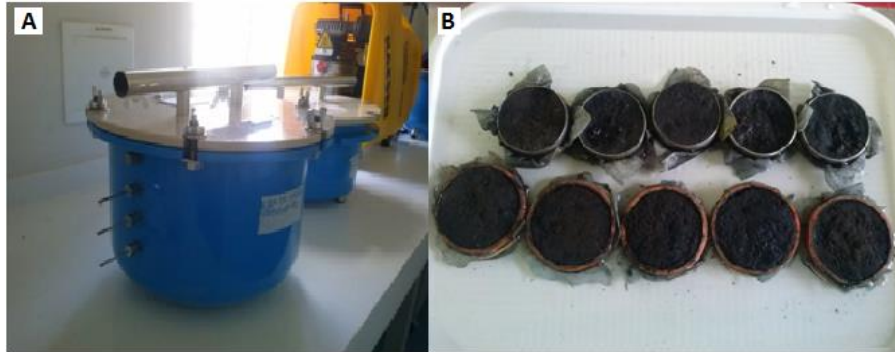
Antes de realizar el diseño experimental y toma de datos de este trabajo de investigación, se consideró necesario realizar el cálculo previo de las necesidades hídricas del cultivo, con lo cual se garantizaría la exposición del mismo a estrés hídrico por déficit, disminuyendo la dosis de aplicación de agua porcentualmente. Para esto, se instaló un sistema de riego por goteo automatizado, con un controlador Hunter X-CORE de 4 sectores de riego para cada invernadero, lo que permite dividir el cultivo en 4 sectores de riego cada uno con su válvula solenoide. Las líneas de goteo tienen una separación entre emisores de 0.1 m y el caudal de emisión es de 2 l/h. A partir de datos encontrados en la bibliografía y de las mediciones realizadas en los invernaderos del estudio, se determinaron las curvas de retención de humedad (CRH), se calculó la densidad aparente del suelo ( $D_a$ ) y se obtuvieron valores de lámina de riego para el cultivo a partir de la evapotranspiración. Para tener una repuesta del cultivo a diferentes láminas de riego y provocar un déficit hídrico en algunas de las camas, se proporcionaron 4 láminas de riego diferentes, reduciéndolas en un 25% cada una respecto a la anterior, denominadas T1- 100% del tiempo de riego calculado  $T_r$  (Testigo), T2-75% de  $T_r$ , T3-50% de  $T_r$  y T4-25% de  $T_r$ .

### **2.2.1 Obtención de curva de retención de humedad CRH y Densidad aparente del suelo $D_a$ .**

Para obtener los puntos críticos del suelo: capacidad campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), y así calcular la lámina de riego  $L_r$ , en términos de tiempo de riego según el controlador de riego utilizado. Se realizó en laboratorio la curva de retención de humedad (CRH) característica del suelo con que se trabajó en los dos invernaderos. Para esto, se utilizó el método de olla (Figura 2-4, A) con 9 puntos de presión entre 0.1 bar y 15 bares: (0,0.1, 0.3, 0.5, 1,3, 5, 10 y 15). Inicialmente se saturaron las muestras de suelo tomadas en anillos de diámetro conocido y se pesaron luego de que las ollas se estabilizaron para cada presión (Figura 2-4, B) según el método gravimétrico de obtención de la humedad el suelo.

18 Implementación de imágenes para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá

---



**Ilustración 2-4:(A) Ollas de presión del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. (B) Saturación de muestras. (Fuente: propia)**

Dado que la humedad obtenida según el método de la olla de presión se obtiene en términos de masa de suelo y agua, la humedad gravimétrica  $\theta(\%)$  que es la que se quiere obtener se calculó según la fórmula:

$$\theta(\%) = M_a * M_{ss}^{-1} * 100 \quad (1)$$

Donde:

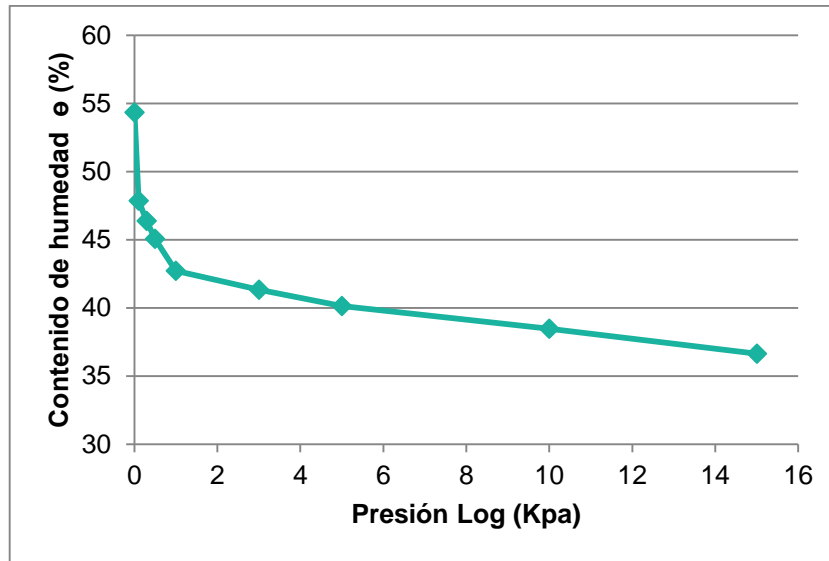
$\theta$  = Humedad Gravimetrica (%)

$M_a$  = Masa de agua (g)

$M_{ss}$  = Masa de suelo seco (g)

De este modo, el contenido de humedad gravimétrico de una muestra de suelo húmedo, se mide pesando una muestra de suelo húmedo, secándola posteriormente en un horno de 105°C por 24 horas y volviendo a pesar la muestra.

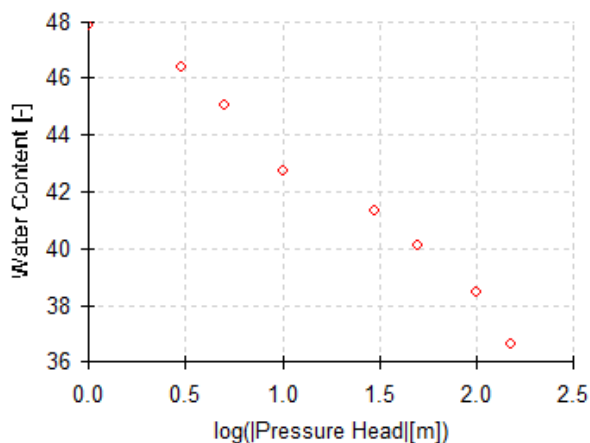
De tal forma, se obtuvieron los pesos promedio del suelo húmedo  $\theta sh$  contenido en los 5 anillos de PVC utilizados en la prueba (se promediaron para cada punto), cada vez que fueron sometidos a diferente a presiones entre 0.1 bar (10 Kpa) y 15 bares (1500 Kpa). Se aplicó la ecuación (1) y se obtuvo el peso del suelo seco de donde se logró la siguiente Curva de Retención Humedad del Suelo (CRH) (Figura 2-1).



**Figura 2-1: Curva de Retención de Humedad del Suelo (CRH) sin ajuste.**

Para realizar la curva se utilizó una escala logarítmica en kilopascales (kPa) en el eje x para las presiones que se manejaron en el laboratorio, la cual tiene un mejor ajuste según Durner, (1994), Este método permite observar el conjunto de la curva, ya que a grados de saturación bajos la pendiente de la curva es elevada y los valores de la succión aumentan rápidamente. En esta gráfica (Figura 2-1), se encontraron los contenidos de humedad del suelo (%) equivalentes a capacidad de campo CC (presión de 0.3 bares o 30 Kpa) 46.38% y punto de marchitez permanente (presión de 15 bares o 1500 Kpa) 36.64%.

Para obtener una muestra gráfica más representativa de la curva característica del suelo anteriormente presentada, se realizó un ajuste con la ecuación de Van Genuchten – Mualem en el programa RECT® (Van Genuchten, M. y otros, 200) (Figura 2-2). Este modelo de Van Genuchten con la condición  $m = 1-1/n$  que maneja el programa RECT® según López-Canteñs y otros (2010), es el que mejor método que describe el comportamiento hidráulico de los suelos y permite realizar el mejor ajuste de la Curva de Retención de Humedad del suelo (CRH).



**Figura 2-2: Curva de Retención de Humedad del Suelo (CRH) con ajuste al modelo Van Genuchten – Mualem en el programa RECT®.**

Por otro lado, la densidad aparente ( $D_a$ ) se define como el peso de una unidad de volumen de suelo que contiene su espacio poroso. Para obtener este parámetro se utilizó el método del cilindro, el cual consiste en extraer muestras de suelo sin disturbar y de volumen conocido, por lo que la densidad aparente puede ser calculada con base a la relación peso seco de la muestra sobre volumen del cilindro. En ese caso se utilizaron las muestras que se tomaron para realizar la curva de retención de humedad (CRH) en cilindros de volumen conocido y se llevaron al horno a secar durante 24 horas, calculando según la ecuación:

$$D_a = M_{ss} * V_c^{-1} \quad (2)$$

Donde:

$D_a =$  Densidad aparente ( $g \cdot cm^{-3}$ )( $0.96 g \cdot cm^{-3}$ )

$M_{ss} =$  Masa del suelo seco ( $g$ )( $38.74 g$ )

$V_c =$  Volumen del cilindro ( $cm^3$ )( $40.54cm^3$ )

La densidad aparente calculada fue de ( $0.96 g \cdot cm^{-3}$ ).

Luego, para la determinación de lámina de riego se calculó la densidad aparente ( $D_a$ ) del suelo según la ecuación (2), teniendo en cuenta el volumen de los cilindros  $V_c$  de 2 cm de alto y 2.54 cm de radio, así como el peso promedio del suelo seco  $M_{ss}$  que se obtuvo al



dejar secar las muestras en el horno. Obteniendo un resultado que concuerda con Dick (2004), quien define para suelos de textura fina una variación de la densidad aparente  $D_a$  entre 1 y  $1.2 \text{ g.cm}^{-3}$ .

### 2.2.2 Selección de los parámetros de riego (Lr – Fr – la – Tr).

Como se dijo anteriormente para realizar el programa de riego del cultivo se utilizó un modelo con base a la relación agua-suelo-planta-ambiente, para esto fue necesario tener en cuenta: la capacidad de retención de agua del suelo (sistema agua-suelo), la demanda climática dado por la evapotranspiración potencial (sistema ambiente-suelo), el coeficiente del cultivo (sistema agua-planta) y la aptitud del cultivo para evapotranspiración (sistema planta-ambiente).

Para ese caso se utilizaron los mismos parámetros que tienen en cuenta Castro et al, 2009 para establecer el programa de riego: La lámina de riego (Lr) con base en la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), la aptitud del cultivo para evapotranspirar o coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) y la Evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>).

La evapotranspiración del cultivo  $ET_c$  (ecuación 3) se obtuvo teniendo en cuenta la evapotranspiración de referencia  $Et_o$  determinada por Esmeral (2011), mediante un tanque evaporímetro para la sabana de Bogotá bajo invernadero, y el coeficiente del cultivo  $K_c$  que utilizó Lopes et al, 2011 para la aromática *Lippia sidoides* en su fase de desarrollo cultivada bajo invernadero:

$$ET_c = Et_o \cdot K_c \quad (3)$$

Donde:

$ET_c = \text{Evapotraspiración del cultivo (mm/día)} (5.03 \text{ mm/día})$

$Et_o = \text{Evapotranspiración referencial (mm/día)} (4.19 \text{ mm/día})$

$K_c = \text{Coeficiente del cultivo (1.2)}$

Del mismo modo, para calcular la lámina de riego (Lr) en términos de la humedad aprovechable de un suelo, se define como la lámina de agua aprovechable a la cantidad de agua retenida por el suelo en el rango entre capacidad campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).

22 Implementación de imágenes para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá

---

$$L_r = (CC - PMP) \cdot 100^{-1} \cdot P_r \cdot D_a \quad (5)$$

Donde:

$L_r =$  Lámina de riego (mm)(13.99 mm)

$CC =$  Capacidad de campo (%) (46.38%)

$PMP =$  Punto de marchitez permanente (%) (36.64%)

$P_r =$  Profundidad de raíces (mm)(150mm)

$D_a =$  Densidad aparente del suelo ( $g/cm^3$ )(0.96  $g/cm^3$ )

Luego, se determinó lámina de riego ( $L_r$ ) definida como la lámina de agua aprovechable (LAA) en el suelo, teniendo en cuenta los puntos de contenido de humedad encontrados en la Curva de Retención de Humedad (CRH): capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), así como la densidad aparente ( $D_a$ ) encontrada en el laboratorio y la profundidad de raíces ( $P_r$ ) promedio para la hierbabuena (*Mentha spicata*) trabajado por Pedraza y Henao (2008) (ecuación 5).

Del mismo modo, mediante esta lámina de riego  $L_r$  y la evapotranspiración del cultivo  $ET_c$ , se encontró la frecuencia de riego  $F_r$  necesaria para cumplir la demanda del cultivo (ecuación 6), la cual define los días que se debe regar el cultivo:

$$F_r = L_r \cdot ET_c^{-1} \quad (6)$$

Donde:

$F_r =$  Frecuencia de riego (días)(2.78 días)

$L_r =$  Lámina de riego (mm)(13.99 mm)

$ET_c =$  Evapotranspiración del cultivo (mm/día)(5.03 mm/día)

Teniendo en cuenta que el sistema de riego que se manejó fue por goteo, se obtuvo la lámina de riego bruta ( $L_b$ ) que el sistema permite aplicar al cultivo con eficiencia de riego  $E_f$  de 85% sugerido por Valenzuela (1997) para cintas de riego, (ecuación 7):

$$L_b = L_r \cdot E_f^{-1} \quad (7)$$

$L_b =$  Lámina bruta (mm)(16.46 mm)

$L_r =$  Lámina de riego (mm)(13.99 mm)

$E_f =$  Eficiencia de riego (%) (85%)

La lámina bruta de riego ( $L_b$ ), indica la humedad necesaria para restituir la humedad consumida por el cultivo y factores ambientales en un período de tiempo. No obstante dicha lámina se aplica a través del sistema de riego, por lo que se necesita conocer la intensidad de la aplicación ( $I_a$ ) (ecuación 8). definida por:

$$I_a = \frac{q_e}{d_l \cdot d_e} \quad (8)$$

Donde:

$I_a =$  Intensidad de aplicación (mm/h) (100 mm/h)

$q_e =$  Caudal del emisor (L/h) (2 L/h)

$d_l =$  Distancia entre laterales (m)(0.1 m)

$d_e =$  Distancia entre emisores (m)(0.2m)

Ahora, para operar el sistema necesitamos conocer el tiempo de riego ( $T_r$ ) (ecuación 9) necesario para aplicar la lámina bruta de riego ( $L_b$ ) mediante la expresión:

$$T_r = L_b \cdot I_a^{-1} \quad (9)$$

Donde:

$T_r =$  Tiempo de riego (h)(0.165h)(9.88 min)

$L_b =$  Lámina bruta (mm)(16.46 mm)

$I_a =$  Intensidad de aplicación (mm/h)(100 mm/h)

De esta forma, se determinó la lámina de riego de referencia para el cultivo, teniendo en cuenta eficiencia del sistema. A partir de este valor, en el proyecto se analizaron láminas

24 Implementación de imágenes para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá

---

reducidas en un 25, 50 y 75%, variando el tiempo de riego  $T_r$  según estos porcentajes para exponer las parcelas a condiciones de estrés por déficit hídrico.

El tiempo de riego  $T_r$  permite programar la operación del sistema por medio de los controladores que solo se programan en minutos enteros y definir los cuatro tratamientos del proyecto de investigación en términos de tiempo de operación (Tabla 2-3), que se aplicaron con una frecuencia de riego de 3 días a la semana:

**Tabla 2-3: Tratamientos de riego según en tiempo de riego calculado**

Tratamiento $T$	Tiempo de riego $T_r$
T1 testigo 100%	10 minutos
T2 75%	7 minutos
T3 50%	5 minutos
T4 25%	3 minutos.

Para acercarnos más un manejo de riego deficitario controlado RDF la frecuencia de riego calcula se aumentó de 3 días a 6 días dividiendo el tiempo de riego calculado. Luego, durante los 3 meses del cultivo se regó inicialmente durante 6 días a la semana a las 4 de la tarde todos los tratamientos con el tiempo de riego de T1 100%  $T_r$ . Luego, durante los últimos 2 meses se mantuvo la  $F_r$  de 6 días y el horario de las 4 de la tarde pero se cambiaron los tiempos de riego según la tabla 2-4.

**Tabla 2-4: Tratamientos de riego según en tiempo de riego calculado con nueva la nueva frecuencia de riego propuesta**

Tratamiento $T$	Tiempo de riego $T_r$
T1 testigo 100%	5 minutos
T2 75%	4 minutos
T3 50%	3 minutos
T4 25%	2 minutos.

## 2.3 Detección de estrés hídrico en hierbabuena.

El estrés hídrico de las plantas actualmente se determina de diferentes maneras, siendo las más usadas la conductancia estomática ( $g_s$ ) y el potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ). En este trabajo se propone el método de las imágenes termográficas (IT) para la obtención de la temperatura del dosel de las planta ( $T_d$ ) como método de determinación de estrés hídrico en la hierbabuena. Se compara este nuevo método con los métodos tradicionales, validando el mismo y la efectividad de los otros para el propósito específico de detección de estrés hídrico en la plantas.

### 2.3.1 Por medio de la conductancia estomática ( $g_s$ )

La actividad estomática de las plantas es uno de los mecanismos que regula la interacción térmica de una planta con su entorno, el cual se ve afectado por el ambiente donde se desarrolla y se manifiesta a través de la tasa de transferencia de calor de la hoja (Jones, 2013). El nivel de la abertura de los estomas tiene una influencia en la forma que las planta regula su transpiración y por lo tanto la resistencia a la evaporación de agua de los estomas. Su inversa, la conductancia estomática ( $g_s$ ), es un indicador adelantado de la transferencia de calor (Garcia, 2014).

Para este estudio, se midió en campo esta conductancia estomática ( $g_s$ ) con el Leaf Porometer de Decacon Devices® (ilustración 2-5), que permite obtener un registro único de la condiciones de cada planta analizada. Diariamente se evaluó en 3 plantas de muestreo por tratamiento la conductancia estomática, a las 9 de la mañana, a las 12 del mediodía y a las 3 de la tarde, durante 40 días.

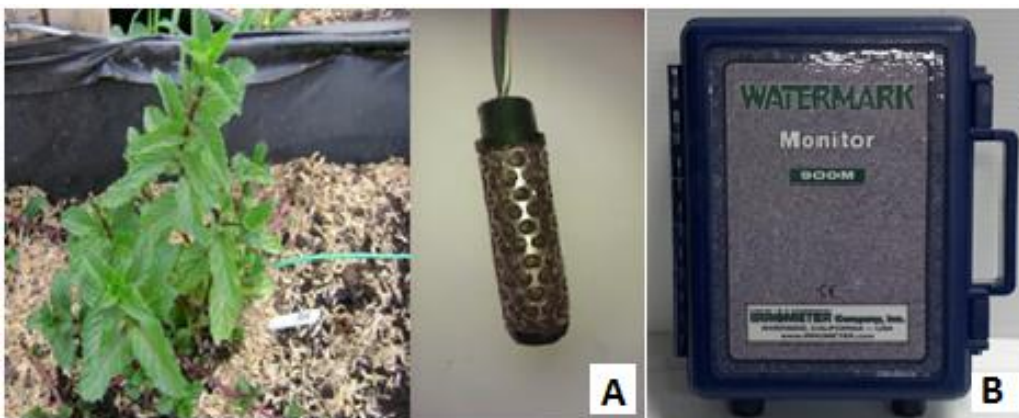


**Ilustración 2-5: Porómetro de hoja para muestras de conductancia estomática en Hierbabuena Decagon Devices® (Fuente: Propia)**

### 2.3.2 Por medio del potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ )

Para evaluar el efecto de los tratamientos y la efectividad de los mismos, se midió en campo el potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) (KPa) mediante sensores de humedad enterrados a la profundidad de raíces de las plantas (Ilustración 2-6 A) y una estación de humedad WaterMark® Monitor Model 900M Soil Moisture Datalogger (Ilustración 2-6 B). Esta estación cuenta con sus respectivos sensores los cuales se enterraron a la profundidad de raíces según las necesidades de control.

La estación de humedad WaterMark® Monitor Model 900M Soil Moisture Datalogger permite tener un registro horario del potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) sin embargo para este trabajo solo se presentan los datos obtenidos a las 9 de la mañana, 12 de medio día y 3 de la tarde).



**Ilustración 2-6: A. Sensor WaterMark® enterrado al nivel de las raíces de la planta. B. Estación de humedad WaterMark® Monitor Model 900M Soil Moisture Datalogger (Fuente: Propia.)**

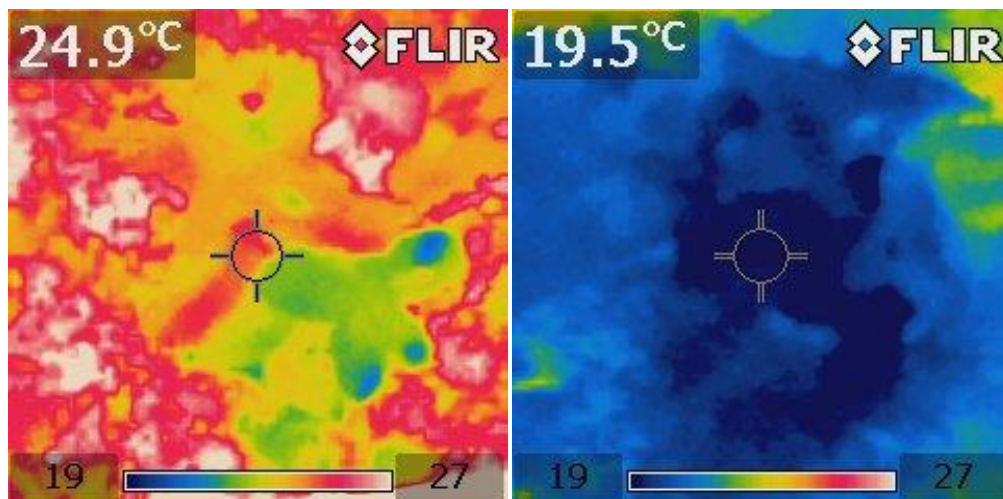
### 2.3.3 Por el medio de imágenes termográficas (IT).

Para la captura de las imágenes termográficas del dosel de cultivo y una imagen general de cada invernadero, se utilizó una cámara termal Flor Sistemas® Modelo A40M (Ilustración 2-7) y para la imágenes reales una cámara fotográfica convencional Sony Cyber-Shot® de 8.1 Mega pixeles.



**Ilustración 2-7: Cámara termográfica Flir Systems® Modelo A40M. (Fuente: Propia.)**

En cada tratamiento se definieron 3 plantas de muestreo (las mismas a las que se midió la conductancia estomática) diario de imágenes termográficas del dosel del cultivo, a las 9 de la mañana, a las 12 del mediodía y a las 3 de la tarde, durante 40 días. Del mismo modo sobre estas horas del día se tomó una imagen general de cada invernadero que permite comparar la temperatura del dosel de las plantas con la temperatura ambiental y durante las primeras semanas se tomó una imagen de una referencia de una planta no regada (referencia seca) y una regada manualmente con exceso de agua (referencia húmeda) (Ilustración 2-8) (procedimiento necesario para normalizar los datos según la técnica del CWSI).



**Ilustración 2-8: Referencia seca ( $T_s$ ) (Izq.) y referencia húmeda ( $T_w$ ) (Der.) respectivamente del dosel de hierbabuena (Fuente: Propia)**

Luego de obtener una base de datos adquiridos del proceso de toma de imágenes mediante el sistema de termografía infrarrojos, un procedimiento clave para la evaluación del estrés de agua del cultivo es calcular el índice de estrés hídrico de cultivo (*Crop Water Stress Index CWSI*) con base en estos datos. El CWSI descrito por (Jones *et al.*, 2002 citado por Wang *et al.*, 2010) que normaliza los datos de la temperatura del dosel (TDK) obtenido por medio de imágenes termográficas y presenta la siguiente ecuación (10):

$$CWSI = \frac{T_c - T_w}{T_s - T_w} \quad (10)$$

Donde:

$T_c$  = Temperatura media de la superficie de transpiración, es decir, la temperatura real medida de toda la cubierta iluminada por el sol. (°C)

$T_w$  = Temperatura de referencia de las hojas húmedas (no estresadas) (°C)

$T_s$  = Temperatura de referencia de las hojas secas (estresadas) (°C)

## 2.4 Seguimiento de variables de la relación Planta – Clima.

Con el propósito expuesto inicialmente de verificar la influencia sobre las necesidades hídricas y respuesta al estrés hídrico del cultivo del medio ambiente de desarrollo, según la variación de las características de las películas plásticas de invernadero. Se realizó el seguimiento de las variables temperatura ambiente ( $T_a$ ) y humedad relativa (HR), que permitió obtener del déficit de presión de vapor (DPV) al que se expusieron las plantas de hierbabuena en cada invernadero, principal características de influencia sobre la apertura y cierre estomático.

### 2.4.1 Temperatura ambiente ( $T_a$ ) y Humedad relativa (HR).

Se caracterizó el clima dentro de los invernaderos tomando medidas continuas de la temperatura (°C) y humedad relativa (%) en centro de los invernaderos ( $T_{ac}$ , Hrs) y a la altura del planta ( $T_{al}$ , Hrs), a lo largo del día cada hora por medio de dataloggers Extech Instruments ® referencia RT40 (Ilustración 2-9). Permitiendo así validar o ratificar o comprobar la influencia del cambio de las películas plásticas en la variación de las



condiciones de cada invernadero, demostrado por Quintero (2015).



**Ilustración 2-9: Dataloggers Extech instruments® ubicado a la altura de la planta.  
(Fuente: Propia.)**

## 2.4.2 Déficit de presión de vapor (DPV)

Como se mencionó anteriormente, el Déficit de Presión de Vapor DPV está definido como una relación entre la presión de vapor de agua presente en el aire y la presión de vapor de agua cuando el aire se encuentra saturado. En este caso, para el cálculo del déficit de presión de vapor (DPV) se tuvieron en cuenta datos obtenidos de los dataloggers Extech Instruments® referencia RT40 (Ilustración 2-10) de la temperatura ambiente ( $T_a$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa (HR) (%), remplazándolos en la ecuación (11) (Montero y Anton, 2002):

$$DPV = (e_s - e) \quad (11)$$

Donde:

$DPV =$  Deficit de presión de vapor (kPa)

$e_s =$  Presión de vapor de aire saturado (kPa) =  $6.108 * \exp((17.27 * T_a)/(T_a + 237.3))$  donde  $T_a =$  temperatura ambiente.

$e =$  Presión de vapor de aire (kPa) =  $e_s * HR$  donde  $HR =$  humedad relativa.

### 2.4.3 Variables fisiológicas (VF)

Los datos de las características fisiológicas se tomaron cada ocho días y dado que la mitad de ellas involucraban pruebas destructivas, todas las medidas se realizaron con las mismas 3 plantas escogidas cada semana. Para esto se escogieron muestras por tratamiento al azar diferentes a las plantas referenciadas para las variables de clima y riego, tratando de escoger plantas al inicio, mitad y final de cada cama. Lo que permitió encontrar las relaciones morfométricas entre las características morfológicas de las plantas y la influencia del cambio de porcentaje de riego por tratamiento.

#### 2.4.3.1. Área Foliar (AF)

El área foliar se determinó mediante imágenes fotográficas y el software utilizado por Rincón *et al*, (2012) que compara la eficiencia de las Cámaras digitales respecto a un medidor de área foliar especializado obteniendo un factor de correlación de  $R=0.99$ . Al igual que ellos, las hojas de las plantas se extendieron sobre una hoja de papel blanco con área conocida y se fotografiaron sobre un fondo de color negro (ilustración 2-10), con una línea de referencia de 2 cm de longitud, lo que facilita el análisis y medición final del área deseada en el software.



**Ilustración 2-10: Imagen fotográfica de las hojas de tratamiento T4 de R1 para análisis de área foliar. (Fuente: Propia.)**

#### 2.4.3.2 Altura de la planta.

Los datos de la altura de la planta se tomaron con una regla teniendo en cuenta el inicio del tallo con respecto a la cobertura del suelo y el final de la última hoja de la copa de la planta. Se realizaron mediciones a 3 plantas (promedio) cada semana completando 10 registros de este parámetro.



**Ilustración 2-11: Medición de la altura de la planta. (Fuente: Propia.)**

#### **2.1.1.1. Materia fresca y materia seca**

En una balanza de precisión se tomó peso de materia fresca. Y luego las muestras fueron secadas por tres días en un horno con una temperatura constante de 70°C para obtener su peso de materia seca.



**Ilustración 2-12: Lectura de la masa fresca (Izq.) y la masa seca (Der.). (Fuente: Propia.)**



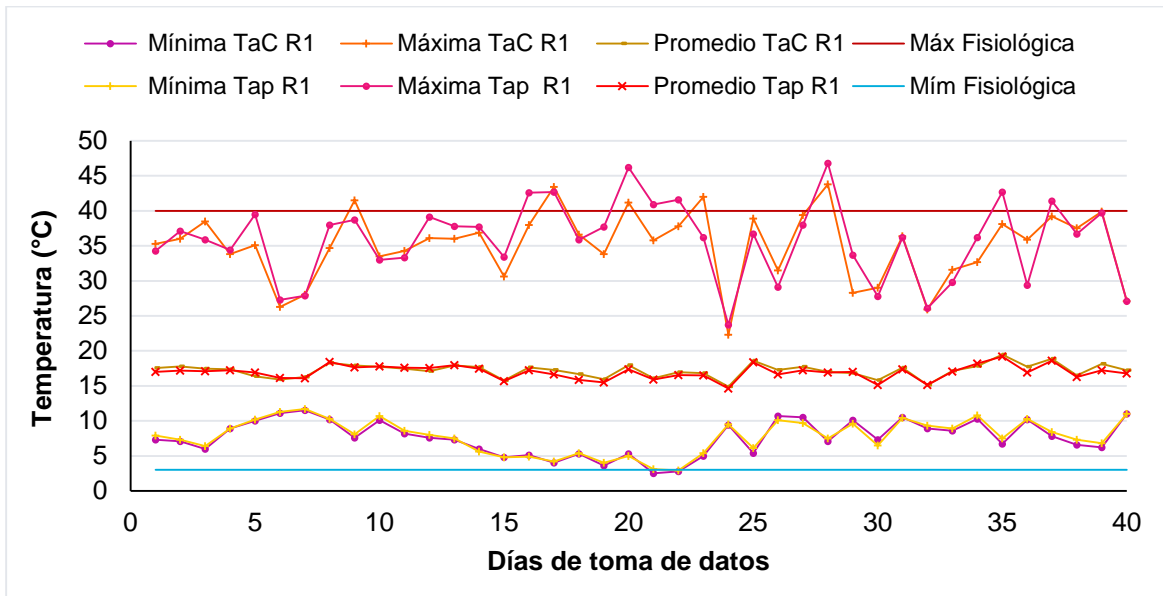
## **3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **3.1. Validación de las diferencias climáticas entre invernaderos**

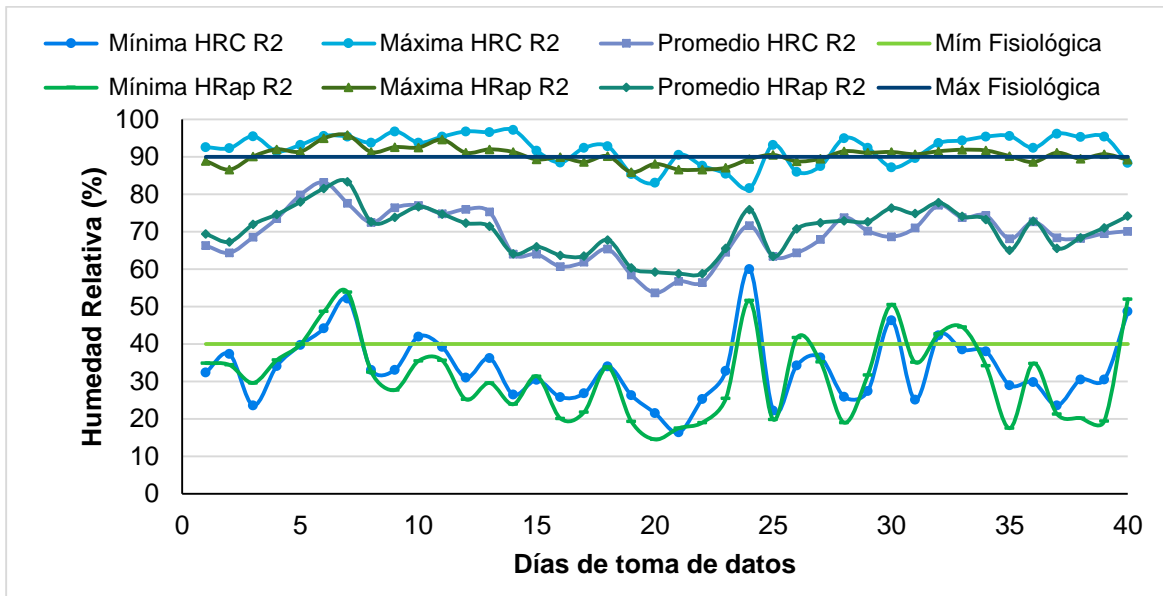
Como se mencionó en la metodología, este experimento se realizó en dos invernaderos con distinta cubierta plástica: R1 (SPEKTRA-3®) y R2 (SPEKTRA-3-DIF®), que por tener diferencias en sus características (porcentaje de difusión de la luz en este caso) presentan un contraste en el microclima interno de acuerdo a lo obtenido por Quintero, (2015). De tal manera, dado que uno de los objetivos de este trabajo es mostrar estas diferencias microclimáticas producidas por los plásticos utilizados, se consideró relevante resumir los datos obtenidos para el análisis de la influencia clima sobre la respuesta al estrés hídrico de la plantas, teniendo en cuenta las temperaturas máximas, mínimas y promedio que se presentaron durante el periodo del cultivo. Del mismo modo, se destacaron las horas del día en que midieron las variables de detección de estrés hídrico: 9 de la mañana, 12 del mediodía y 3 de la tarde (ANEXO A), acentuando o no el efecto clima sobre este parámetro abiótico y sobre los métodos de detección de estrés hídrico.

#### **3.1.1 Diferencias en las medidas entre el centro del invernadero (C) y a la altura de la planta (Ap)**

Como se puede observar en las figuras 3-1 y 3-2, existe una diferencia presentada en los dos invernaderos de los datos de las temperaturas y las humedades relativas registradas en el centro del invernadero ( $T_{ac}$  y  $H_{RC}$ ) a la altura de la planta ( $T_{ap}$  y  $H_{Rap}$ ) promedio. Diferencias que se hacen más evidentes en las temperaturas máximas, en las humedades relativas mínimas y en cada una de las horas analizadas (9 de la mañana, 12 del mediodía y 3 de la tarde) en especial a las 9 de la mañana como se puede ver en el análisis más detallado presente en el Anexo A.



**Figura 3-1: Temperaturas promedio a la altura de la planta Ap y en el centro C del invernadero R1.**



**Figura 3-2: Humedad relativa promedio a la altura de la planta Ap y en el centro C del invernadero R2.**

A estos datos se le realizó un análisis estadístico de normalidad por medio de la prueba Shapiro-Wilk para  $n < 50$  según Fernández *et al*, (2010), descartando aquellos que cumplieran esta característica de un comportamiento similar al de la distribución normal y

que esto limita su probabilidad de ocurrencia, y la posibilidad de realizar otras pruebas estadísticas con este tipo de datos no normalizados.

Esta diferencia de lecturas medidas la altura de la planta  $A_p$  y en el centro del invernadero C, concuerda con el último experimento realizado por Quintero (2015) para lechuga (*Lactuca Sativa*) en la Sabana de Bogotá, donde encontró diferencias significativas entre la ubicación de los dataloggers Extech Instruments® para dos invernaderos de cubiertas térmicas diferentes con ventilación natural en dos diferentes épocas del año a la altura de la planta y en el centro del invernadero a 1.5 metros sobre el nivel de piso de los mismos.

A diferencia de lo encontrado por E.-Jaimez *et al.* (2005) en Venezuela para pimentón (*Capsicum annum*) quienes manejaron un análisis del perfil de temperatura dentro del invernadero sin ventilación 1.5 hasta 4 m y a la altura de la planta. Y en las tres localizaciones evaluadas no existieron diferencias significativas de temperaturas entre diferentes alturas dentro del invernadero, lo que permite enfatizar en la importancia de las aperturas laterales en para lograr mejores intercambios de aire entre el interior y exterior, que mejoran la renovación de aire dentro de los invernaderos.

El microclima generado dentro de los invernaderos por la radiación y el movimiento del aire entre otros, describe los procesos energéticos y de transferencia de masa, de intercambio calórico entre el aire, la planta y otras superficies, y por tanto las formas en que las plantas responden a factores ambientales (Svein, 1993). Por tal razón, en el caso de la temperatura y humedad relativa se debe tener en cuenta la diferencia el gradiente generado a nivel de techo y de la altura de la planta manejado por Sumathy (1999) y Kittas *et al.* (2012), para relacionarlo con la influencia de los mismos sobre las plantas.

Por tal motivo, se destaca la influencia del factor clima en las necesidades hídricas de los cultivos, teniendo en cuenta que según Moratíel y Martínez-Cob, (2012) dependen de la demanda de agua integrada con los efectos de la radiación, el viento, la temperatura ambiente y la humedad relativa. Y que la resistencia de los estomas al efecto clima dentro de los invernaderos es presentada por un modelo de transpiración sugerido por Demrati *et al.*, (2007) donde se deben tener en cuenta las condiciones ambientales interiores y de contorno, trabajando preferiblemente el gradiente de temperatura a nivel de la planta, considerando su mayor influencia sobre todos los procesos fisiológicos del cultivo, en especial en el proceso de transpiración del dosel que influye en la conductancia estomática, la temperatura de las hojas de las plantas, y por ende las necesidades de agua del cultivo.

Razón por la cual a partir de este momento se trabajara con las temperaturas y humedades relativas ambientales obtenidas a la altura de la planta.

### 3.1.2 Diferencias microclimáticas entre R1 y R2.

Dado que los dos tipos de cubierta plástica de invernadero con iguales propiedades de resistencia mecánica, termicidad y tramitación de luz en la región PAR pero con diferentes porcentajes de difusión de la luz: invernadero uno R1 SPEKTRA-3® (35% de difusión de la luz) e invernadero dos R2 SPEKTRA-3DIF® (82% de difusión de la luz). Corroborando estadísticamente por comparación de medias, la hipótesis inicial de la existencia de dos ambientes controlados con microclimas diferentes que se dan solo con el cambio de una o algunas de la propiedades de los plásticos presentadas por varios autores anteriormente nombrados.

De tal forma, en las figuras 3-3 y 3-4 se compararon entre si los datos de temperatura (Ta) y humedad relativa (HR) obtenidos para los dos invernaderos, donde se puede observar en la gráficas iguales tendencias de comportamiento pero con pocas coincidencias en cada punto.

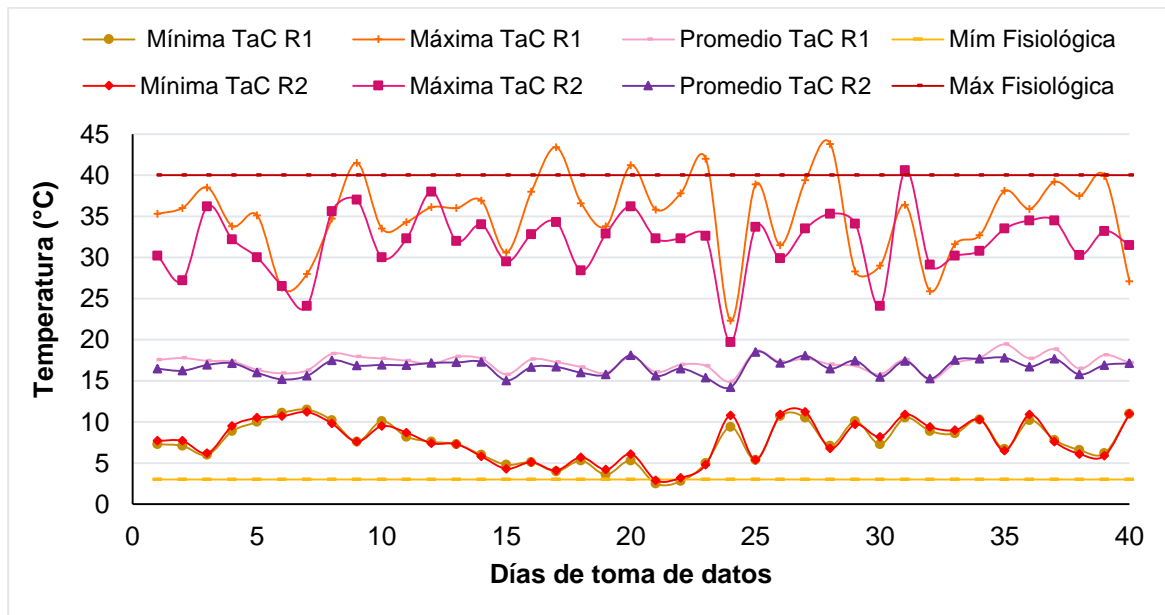
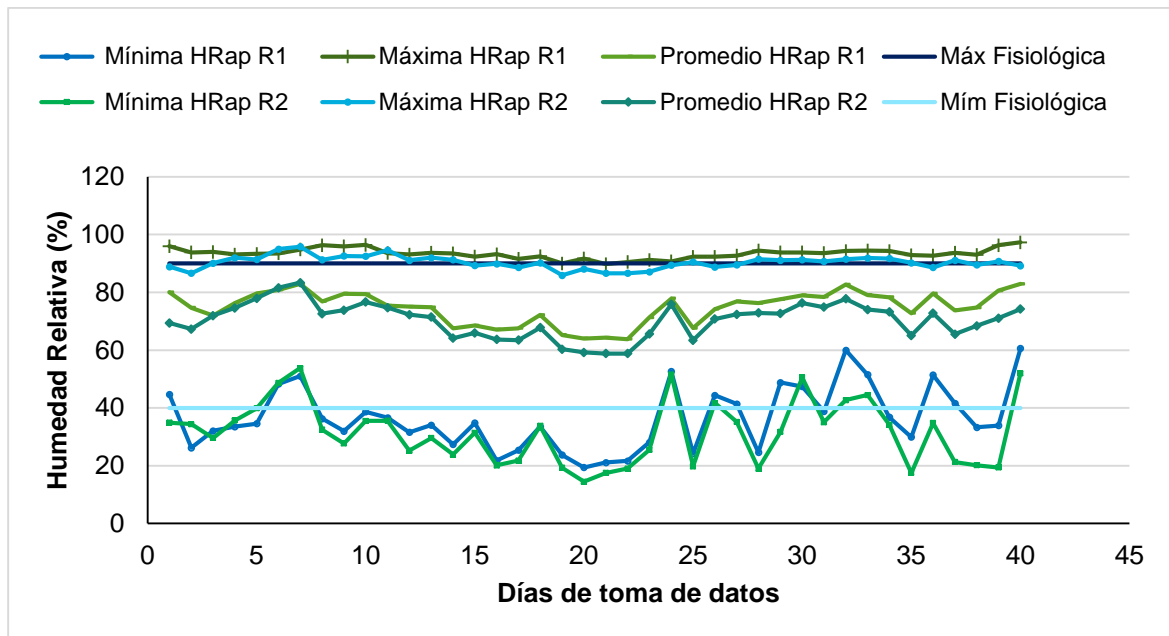


Figura 3-3: Comportamiento de Ta en R1 y R2 en el centro del invernadero C





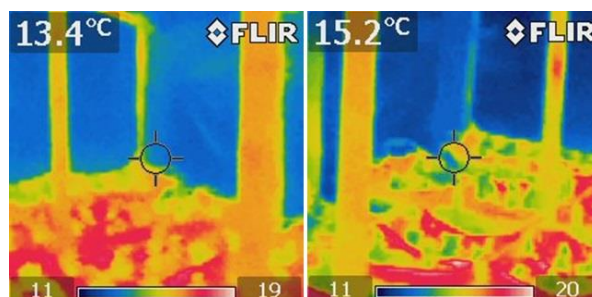
**Figura 3-4: Comportamiento de HR en R1 y R2 la altura de la planta Ap**

Los resultados obtenidos estadísticamente de la prueba de comparación de medias T-Student para pruebas relacionadas, confirmaron nuevamente la teoría inicial de que se trabajó con dos invernaderos, con microclimas diferentes generados por las diferentes cubiertas plásticas en cada uno de ellos (Quintero, 2015). Dado que, aunque el fabricante garantiza la misma capacidad de termicidad de los dos plásticos, para todas las horas de medición se mostró una diferencia en la tendencia del comportamiento de las temperaturas entre ambos invernaderos y una diferencia estadística significativa entre las humedades relativas medidas en horas de la mañana. Lo que destaca la importancia de los efectos de las películas plásticas en el microclima de cultivos y el uso del agua del cual se ha investigado en varios estudios durante las últimas dos décadas (Pirkner et.al, 2014).

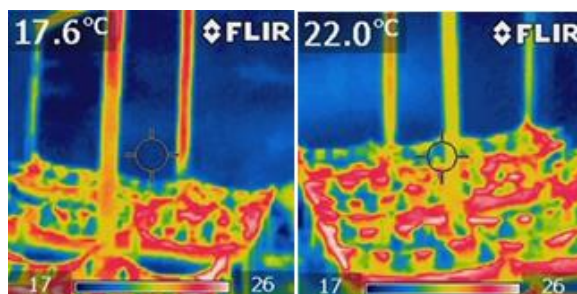
La temperatura del aire interior de un invernadero es el resultado integral de varios procesos de transferencia de energía simultáneos que incluyen el intercambio de radiación, la convección (ventilación) y la evapotranspiración. Por esto, la existencia del efecto sombra dentro de este reduce la cantidad de energía radiante almacenada, y por lo tanto tiene el potencial de reducir la temperatura del aire (Tanny, 2013). Este fenómeno se presenta dentro del invernadero uno R1 que tiene un menor porcentaje de difusión de la luz con respecto al otro invernadero dos R2 el cual garantiza la difusión de la luz con la posibilidad de evitar el 82% de sombra, y por tanto menores lugares de pérdida de calor.

Por esto al medio día, cuando el sol se encuentra sobre ambos invernaderos no existe mayor porcentaje de sombra y por ende no se presentan diferencias significativas.

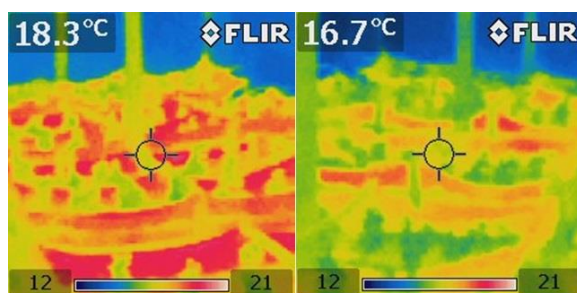
Del mismo modo, en las ilustraciones 3-1, 3-2, 3-3 tomadas con la cámara termográfica también se presentan las diferencias en términos de la temperatura ambiental entre los dos invernaderos. Siendo mayor en horas de la mañana y el medio día la temperatura en R2 y menor en horas de la tarde.



**Ilustración 3-1: Diferencia de temperaturas a las 9 de la mañana entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.).**



**Ilustración 3-2: Diferencia de temperaturas a las 12 del medio día entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.).**



**Ilustración 3-3: Diferencia de temperaturas a las 3 de la tarde entre R1 (izq) y R2 (der) respectivamente. (Fuente: Propia.).**

## 3.2 Respuesta fisiológica del cultivo de hierbabuena a las variaciones de riego y clima

Para encontrar la lámina de riego óptima para el cultivo de hierbabuena expuesta a dos condiciones ambientales de producción y a cuatro diferentes tratamientos de riego, se realizó un seguimiento de parámetros de crecimiento fisiológico (altura de la planta, peso fresco, peso seco y área foliar), durante 10 semanas como lo muestra la gráfica 3-5. Donde para cada una de estas variables se encontró una variación evidente de respuesta frente a los tratamientos de riego y ambiente.

En general se presentó un incremento en las características morfológicas de altura y área foliar en ambos invernaderos a lo largo del ciclo. Sin embargo, las variables peso fresco y seco disminuyó desde las semanas que se presentaron las mayores temperaturas ambientales en ambos invernaderos (mayor temperatura ambiental, mayor demanda de agua), en especial en los tratamientos T3 y T4 (los más afectados por la cantidad de agua aplicada). Esto concuerda con los resultados obtenidos por Kumar *et al.* (2007) donde las tendencias acumulativas de los parámetros de crecimiento vegetativo para las cebolla (*Allium cepa* L.) fueron similares a la biomasa producida. Sin embargo esta biomasa de peso seco fue influenciada por la cantidad de agua de la planta aplicada por lo que presentó una variación entre los tratamientos. Y disminuyó ligeramente para los tratamientos con mayor porcentaje de agua de aplicación y significativamente en el menor tratamiento de riego debido a la pérdida de hojas secas.

Por otro lado, realizando una comparación entre los dos invernaderos se encontró que el cultivo que se desarrolló en el segundo invernadero R2 con el plástico de mayor difusividad de la luz, presentó un mayor rendimiento de materia fresca y seca, dado que se activa el metabolismo de las plantas por más tiempo y por ende la producción de masa fresca y masa seca. De tal forma, se puede afirmar que para nuestro estudio, la cantidad y calidad de la luz transmitida por los plásticos afecta el crecimiento de las plantas de forma directa, ya que una disminución en estas variables tiene un efecto negativo sobre el cultivo, coincidiendo con la afirmación de (Cerny *et al.* 1999) quienes mencionan que se ha demostrado que la intensidad de luz interceptada afecta la velocidad de crecimiento de la planta, al estar directamente relacionada con el proceso fotosintético (García-Enciso *et al.* 2014).

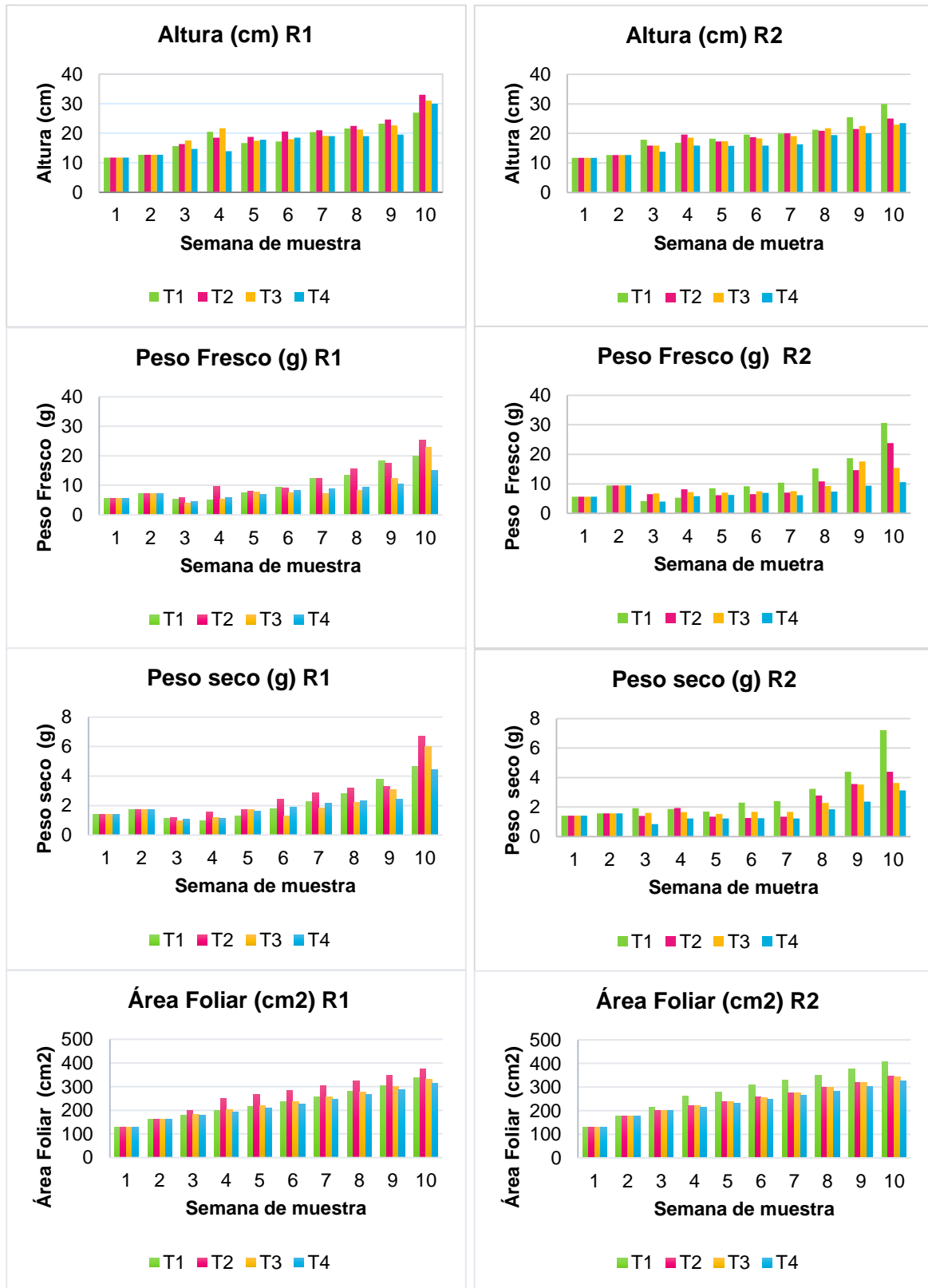


Figura 3-5: Comportamiento de las

### variables fisiológicas para R1 y R2.

De igual manera los resultados obtenidos concuerdan con, Xianmin Chang, *et al* (2008), quienes encontraron que el nivel de radiación solar y los niveles de irradiación que proporcionaron en el invernadero, alteran el crecimiento de la albahaca (*Ocimum basilicum* L.) y su contenido de aceites volátiles, entonces la hierbabuena, al igual que la albahaca, crece bien a pleno sol, sin embargo, puede tolerar una sombra ligera. Un sombreado excesivo da lugar a plantas más bajas, menor peso y el área foliar más pequeña. Sin embargo, son afirmaciones que es necesario validar con un estudio particular de la incidencia de la luz sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo, manteniendo las mismas condiciones de suelo, riego y nutrición.

Más específicamente para el caso del invernadero uno R1 se evidenció que la lámina de riego del tratamiento dos T2 al 75%, durante y al final del ciclo del cultivo mostró mejores características fisiológicas que los demás tratamientos. La tabla 3-1 muestra una diferencia entre las medias de las cuatro variables fisiológicas en la última semana del cultivo comparando el tratamiento T2 al 75% y el tratamiento T1 al 100% de la lámina de riego

**Tabla 3-1: Comparación de la respuesta fisiológica en R1 de los tratamientos de riego T1 y T2.**

Tratamiento	Altura (cm)	Peso Fresco (g)	Peso seco (g)	Área foliar(cm <sup>2</sup> )
T1 100%Tr	27.00	19.95	4.66	338.72
T2 75%Tr	33.00	25.30	6.71	375.74
T2 50% Tr	31.00	22.98	5.99	332.07
T2 25% Tr	30.00	15.08	4.43	315.74

Este mayor rendimiento permite afirmar que con una disminución del 25% de la lámina de riego calculada para el suelo orgánico con que se trabajó, y la condiciones ambientales ofrecidas por el plástico de cubierta de invernadero Spektra-3 se obtiene un mejor rendimiento de cultivo. Es decir, que con el 75% lamina de riego se suple la cantidad de agua que se pierde por evapotranspiración, suficiente para el normal funcionamiento de ella, tal como fue encontrado por Álvarez et ál. (2008) para Romero (*Rosmarinus officinalis* L), y como lo demostraron Balaguera et ál. (2008), para el caso del peso fresco

y el peso seco para plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum L.*), que con una lámina de 0.8 se obtuvieron mejores resultados que con un lamina 1.0 de la evaporación medida.

Del mismo modo, en el invernadero dos R2 a diferencia del invernadero uno R1, la lámina de riego del tratamiento uno T1 al 100% durante todo el ciclo del cultivo mostró mejores características fisiológicas que los demás tratamientos. La tabla 3-2 muestra una diferencia entre las medias de las cuatro variables fisiológicas en la última semana del cultivo comparando el tratamiento T1 al 100%y el tratamiento T2 al 75 % de la lámina de riego.

**Tabla 3-2: Comparación de la respuesta fisiológica en R2 de los tratamientos de riego.**

Tratamiento	Altura (cm)	Peso Fresco (g)	Peso seco (g)	Área foliar(cm <sup>2</sup> )
T1 100%Tr	30.00	30.25	7.22	405.46
T2 75%Tr	25.00	23,82	4.40	345.04
T2 50% Tr	23.00	15.39	3.64	342.74
T2 25% Tr	23.50	10.53	3.14	326.84

Luego, para las condiciones de plástico con mayor difusión de la luz, las plantas necesitan más agua para su desarrollo, ya que tienen un mayor rendimiento fotosintético dado por un mayor porcentaje de luz presente en este invernadero, razón por la cual se debe conservar la lámina del riego del tratamiento T1 al 100%, para obtener un mayor rendimiento del cultivo.

Sin embargo, comparando los resultados obtenidos en ambos invernaderos se tienen mayores resultados de rendimiento para las 4 variables analizadas con el plástico de mayor difusión de la luz en el tratamiento uno T1. Luego, en el caso en que se quiera disminuir la cantidad de agua aplicada se puede hacer con un plástico de bajo porcentaje de difusión de la luz. Disminuido la cantidad de agua utilizada y contribuyendo a la hulla ecológica del planeta. Pero si lo principal para el productor es producir en masa y tener una ganancia en redimiendo sobre los demás productores puede utilizar un plástico con mayor difusión de la luz y el máximo de agua necesaria según la demanda metabólica del cultivo.

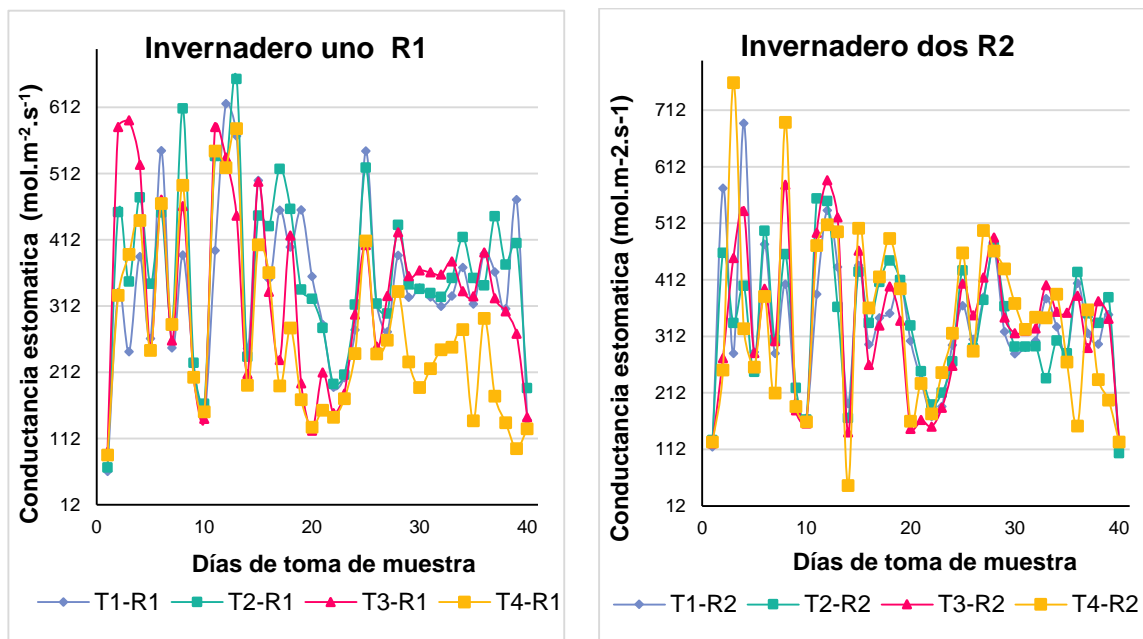
### **3.3 Análisis de la detección de estrés hídrico medido por diferentes métodos tradicionales.**

#### **3.3.1 Por conductancia estomática ( $g_s$ )**

Los microclimas generados influyen sobre la apertura y cierre de estomas del cultivo, los cuales regulan la temperatura del dosel (traspiración). La conductancia proporciona una relación directa del flujo de agua desde la copa de la planta hasta las hojas y facilita la extensión de la misma partir de mediciones de una sola hoja (a través de porómetros, que miden la conductancia de salida) (Campbell y Norman, 1998).

Los datos obtenidos de esta variable medida las 9 de la mañana se muestran en la figura 3-6, donde en R1 desde el inicio de toma de datos se muestra una baja conductancia en el tratamiento T4 y mayor en el tratamiento T2. Mientras que en R2 no se evidencia un tratamiento claro con menor o mayor respuesta a la conductancia. Luego, a medida que disminuye el porcentaje de riego disminuye la conductancia estomática ( $g_s$ ), relación que se se mantiene durante las siguientes dos horas del día analizadas en el estudio (12 pm y 3 pm).

Realizando un análisis de normalidad con la prueba Shapiro-Wilk para  $n < 50$  el único tratamiento en los dos invernaderos que no presenta un compartimiento similar a la distribución normal fue el tratamiento cuatro T4 del invernadero uno R1 a esta hora del día. Según la prueba T-Student para muestras relacionadas existen diferencias significativas entre casi todos los tratamientos de R1 excepto entre T1 y T3, y en R2 los tratamientos no presentan diferencias significativas con un nivel de significancia del 5 % (Anexo B). Esta diferencia no significativa entre T1 y T3 en todo el ciclo del cultivo no se mantiene al final del mismo ya que a partir del día 25 luego de presentarse la temporada de altas temperaturas en la ciudad, la deficiencia de agua en el tratamiento T4 es evidente en un cierre de estomas constante y descendiente (a medida que pasa el tiempo los estomas se cierran más a las misma hora del día) en este invernadero. Luego para este caso, el método del porómetro evidencia un retardo en la detección de estrés hídrico en el cultivo que solo detecta luego de un periodo de calor y sequía contundente para el comportamiento normal de los estomas de la planta.



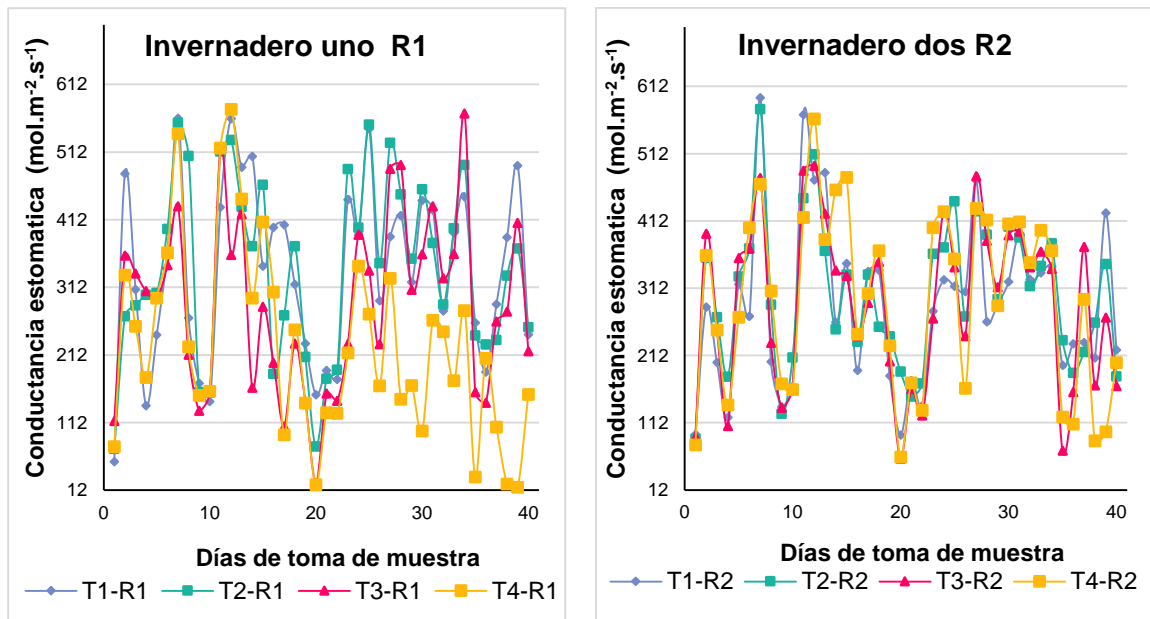
**Figura 3-6: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 9 de la mañana.**

En la figura 3-7 se muestran el comportamiento de la conductancia estomática  $g$  para los dos invernaderos del cultivo a las 12 del mediodía. En ellas se presentó una clara diferencia en las repuestas de los tratamientos de R1. Por el contrario, el comportamiento de los tratamientos de R2 tiene igual tendencia, presenta muchas coincidencias.

Según el análisis estadístico de normalidad Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , todos los tratamientos de los dos invernaderos presentan un comportamiento similar a la distribución normal a esta hora del día. Luego, comparando las medias de los tratamientos por medio de la prueba T-Student para muestras relacionadas, los únicos tratamientos que no presentan diferencias significativas en R1 son T1 con respecto a T2. Mientras que como se visualiza claramente en la gráfica 1-5 en R2 no existen diferencias significativas entre las respuestas a esta hora del día de la conductancia estomática para todos los tratamientos con un nivel de significancia de 5%

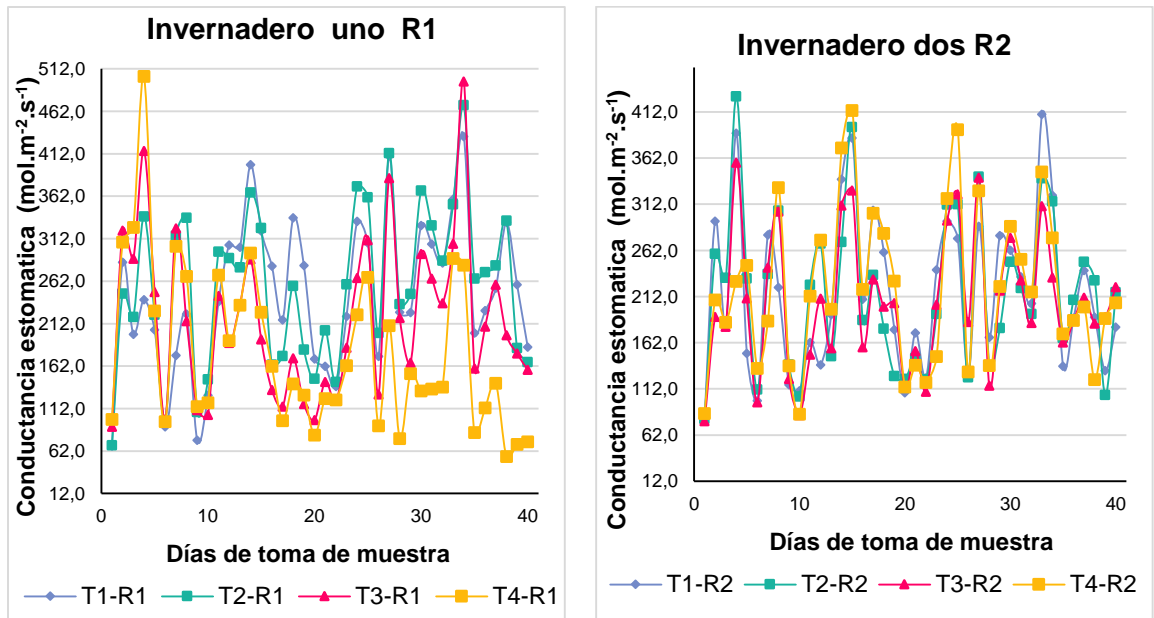
En horas del mediodía, se presenta evidencia de la influencia presentada en los tratamientos de riego respecto a la apertura y cierre de los estomas. Ya que en horas del día la planta tiene mayor necesidad de transpirar y regular su temperatura, pero si se observa en las gráficas de la figura 3-7, el día 20 en el cual hubo la mayor temperatura ambiental la planta cierra sus estomas para evitar pérdidas de agua.





**Figura 3-7: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 12 del mediodía.**

En la figura 3-8 se observa la tendencia de la conductancia estomática g para los dos invernaderos del cultivo a las 3 de la tarde. En la cuales, igual que a las 12 del medio día se presentó una diferencia en las repuestas de los tratamientos de R1 que no se evidencia en R2.



**Figura 3-8: Conductancia estomática para R1 y R2 a las 3 de la tarde.**

Del mismo modo, los únicos tratamientos en los dos invernaderos que no presentan un comportamiento similar a una distribución normal son T3 y T4 de R1 por la prueba de Shapiro-Wilk para  $n < 50$ . Y comparando las medias para pruebas relacionadas de T-Student, que no presentan diferencias significativas en R1 son T1 con respecto a T2 y en R2 los únicos que si presentan diferencias significativas son T3 con respecto a T4 (Anexo B).

Como se observó en todas las horas del día, las medidas la respuesta de la conductancia estomática ( $g_s$ ), en R1 es diferenciada entre en los tratamientos. Comportamiento que está dado por un suministro de agua limitado en las raíces de las plantas donde a menor cantidad de agua disponible menor transpiración que provoca que la conductancia de los estomas de las hojas disminuya. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Takahiro Sato et ál. (2006), quienes realizaron un seguimiento de conductancia estomática ( $g_s$ ) del trigo (*Triticum aestivum*) cultivado bajo tres regímenes de riego. Donde la depresión del mediodía de ( $g_s$ ) fue evidente en las observaciones diurnas incluso con suficiente agua en el suelo, y un análisis de los datos indicó una relación significativa entre la ( $g_s$ ) y la disponibilidad de agua.

Por otro lado, en R2 no se presentó esta diferencia marcada de la respuesta a la conductancia estomática ( $g_s$ ) de los diferentes tratamientos de riego que se utilizaron en las tres horas del día analizadas. Recordando que este invernadero tiene una cubierta plástica diferente y que presentó mayores temperaturas que las del invernadero R1, esto provoca mayores presiones de vapor que influyen significativamente sobre la respuesta estomática.

Así, las estimaciones de ( $g_s$ ) para R2 mostraron una aparente estabilidad en condiciones de alta demanda evaporativa en todos los regímenes de humedad. Lo que concuerda con el caso de Xue *et al.*, 2004 que destacan las respuesta de ( $g_s$ ) a diferentes aplicaciones riego suplementario marcado por un cierre de los estomas unificado dada por una alta de presión de vapor, la cual puede desempeñar un papel importante en las práctica de riego, ya que la aplicación de un riego suplementario al norte de Siria en se lleva a cabo bajo alta demanda evaporativa.

De tal manera, el método de la conductancia estomática ( $g_s$ ) es útil en cubiertas plásticas de menor difusión de de la luz donde se presentan las diferencias de respuesta a los tratamientos de riego. Diferencias de comportamiento entre tratamientos de riego que no

se evidencian en el invernadero con un 82% de la difusión de la luz. Lo que evidencia la susceptibilidad del método a las condiciones ambientales de desarrollo del cultivo, el cual interfiere en la apertura y cierre estomático.

### 3.3.2 Por potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ )

El potencial matricial de suelo ( $\Psi_{ms}$ ) se midió diaria y horariamente en los dos invernaderos gracias a la estación de humedad WaterMark® Monitor Model 900M Soil Moisture Datalogger. Esta presentó un registro de los cuatro tratamientos en cada invernadero de la cantidad de agua disponible para las plantas en las horas de análisis de estrés hídrico manejadas: 9 de la mañana, 12 del mediodía y 3 de la tarde.

En las figuras 3-9, 3-10 y 3-11 se muestra el comportamiento de la retención de humedad del suelo para los cuatro tratamientos de riego en los dos invernaderos estudiados. Donde para ambas invernaderos en las tres horas analizadas se evidencian diferencias en el comportamiento de los tratamientos pero la misma tendencia entre los mismos, donde el tratamiento T4 siempre presentó los mayores datos de ( $\Psi_{ms}$ ) por encima de los demás tratamientos.

En términos del Potencial matricial ( $\Psi_{ms}$ ) se observa inicialmente que todos los tratamientos estuvieron dentro del rango de capacidad de campo descrito entre 0 y 30kPa durante los primeros días del ensayo en las diferente horas del día, y luego comenzaron a incrementar hasta llegar a un estrés provocado por las condiciones ambientales dadas luego del día 30.

Realizando un análisis estadístico de normalidad por la prueba de Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , para las nueve de la mañana solo el tratamiento tres T3 de R1 presenta un comportamiento similar al de la distribución normal. Para las 12 del medio día solo cumplen con esta característica los tratamientos tres T3 de ambas invernaderos R1 y R2. Y para las 3 de la tarde en R1 los tratamientos T2 y T3 y en R2 los tratamientos T1 y T2, cumplen con esta característica de normalidad (Anexo B).

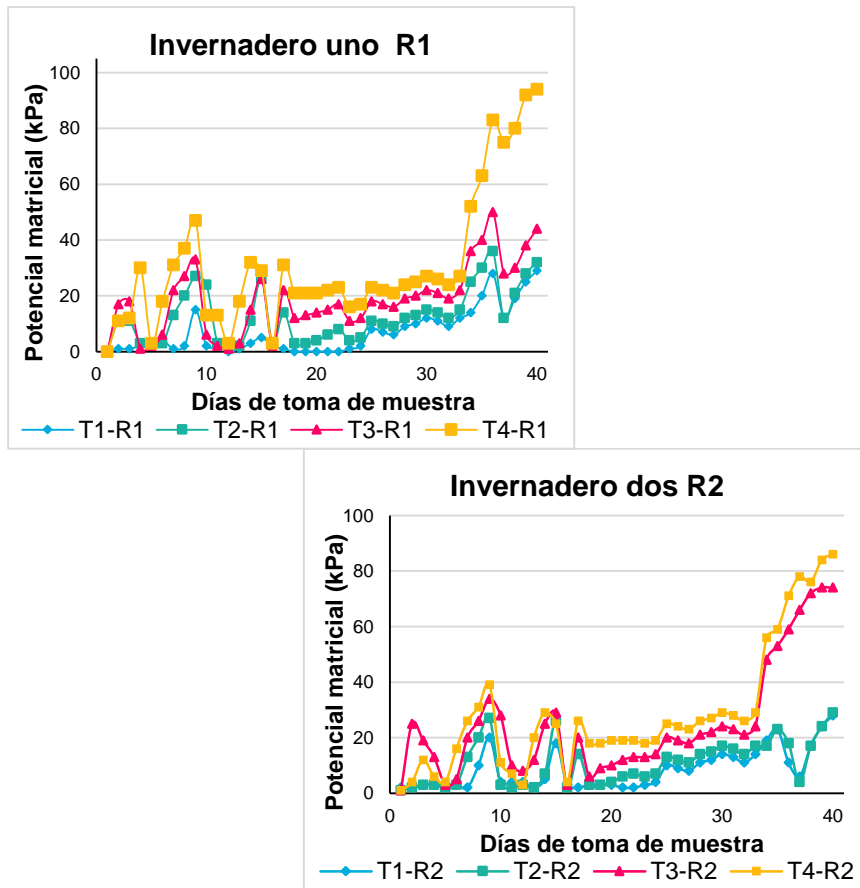


Figura 3-9: Potencial Matricial para las R1 y R2 registradas a las 9 de la mañana.

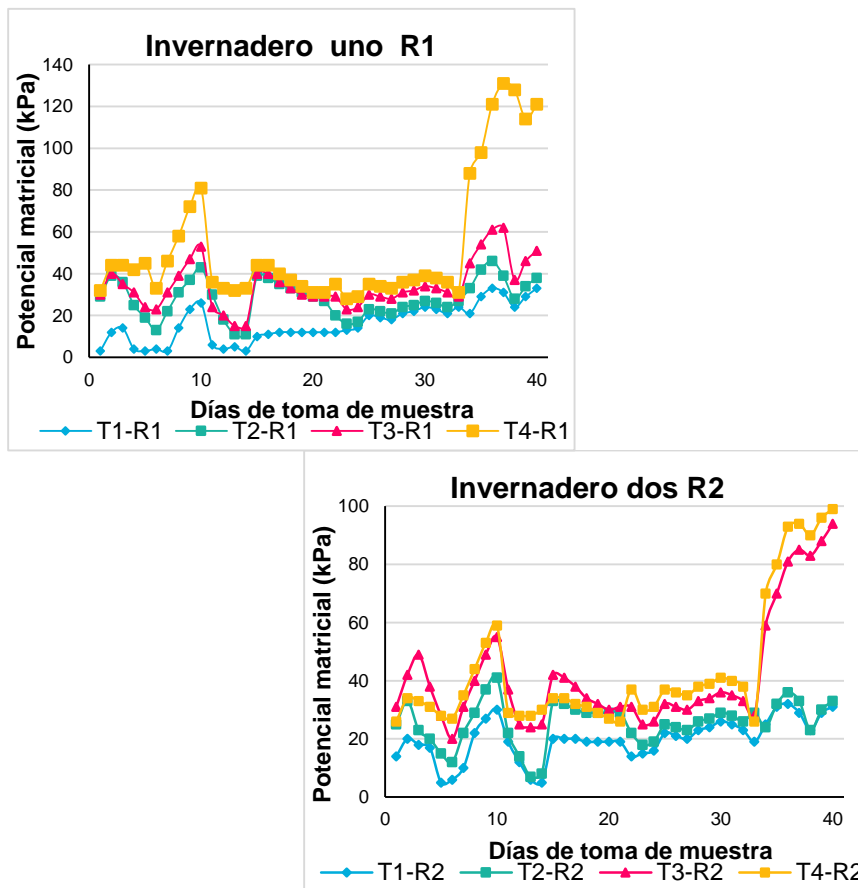
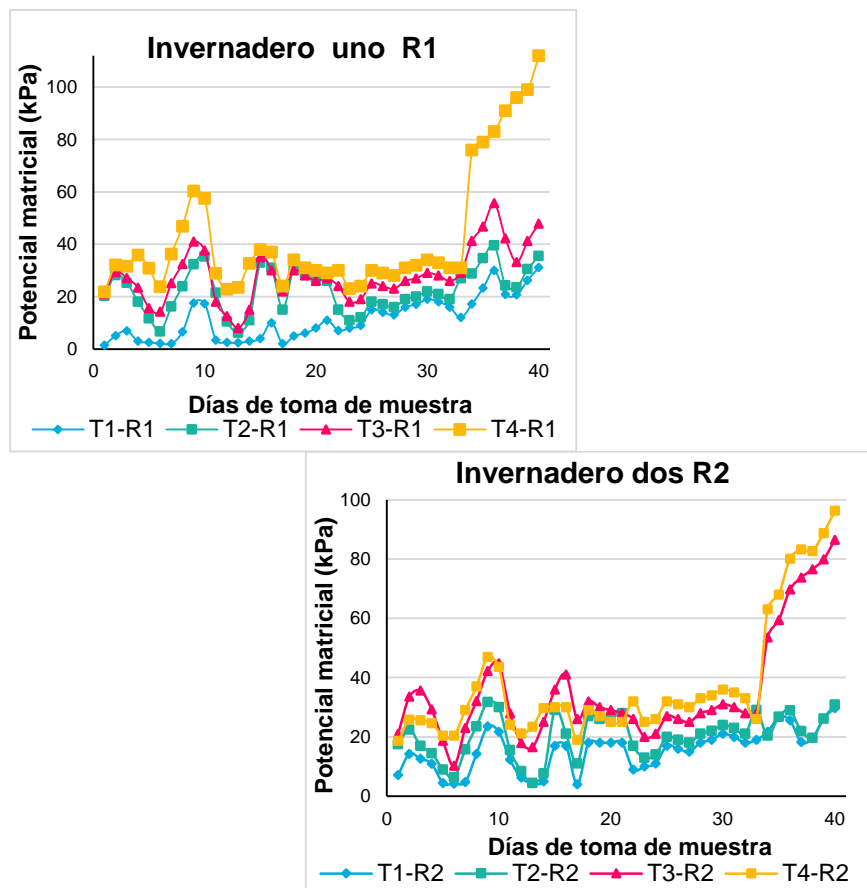


Figura 3-10: Potencial Matricial para R1 y R2 registradas a las 12 del medio día



**Figura 3-11: Potencial Matricial para R1 y R2 registradas a las 3 de la tarde.**

Esta poca normalidad presentada en el potencial matricial de suelo ( $\Psi_{ms}$ ) demuestra que es una característica de datos aleatorios difícilmente repetibles. Donde se encontró una gran influencia por el día y la hora en términos de la temperatura del ambiente de ( $T_a$ ) y la humedad la humedad relativa (HR). La posibilidad de tener ambientes iguales entre días es mínima entre invernaderos y mucho más en un cultivo expuesto a la intemperie. Es el caso de Cardenas *et al.*, (2010) quienes al monitorear el potencial matricial de suelo ( $\Psi_{ms}$ ) respecto a la precipitación diaria y su impacto en la humedad del suelo ( $\Theta_s$ ) a través del tiempo. Encontrando que las condiciones climáticas húmedas y secas se reflejaron en la humedad el suelo ya que la mayoría de las veces el suelo se mantuvo con una baja condición húmeda; excepto para el período de lluvias.

De igual forma, en todas las figuras se puede observar que existió una disminución de retención del agua y aumento del potencial matricial de suelo ( $\Psi_{ms}$ ) a partir del día 30

luego de los días en que registraron las mayores temperaturas del experimento, que se puede denominar como periodos de sequía. Que concuerda con las respuestas presentadas por el suelo para níspero 'Algerie' (*Eriobotrya japonica* Lindl.) medidas por Cuevas et ál., (2012). Donde las lecturas del Watermark disminuyeron significativamente en todos los tratamientos de en menos de dos semanas después de que el riego se suspendió, especialmente evidente en aquellos tratamientos en los que el período seco ambientalmente fue más de tres semanas.

Para lo que Thompson et al, (2007), utilizaron durante los periodos más cálidos, lechada de cal (suspensión de carbonato de calcio) en la cubierta del invernadero para reducir la temperatura dentro del mismo para el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*) quien a diferencia de los cultivos de melón (*Cumis Melo*) y pimentón (*Capicúa anua*) en el mismo experimento, mostro registros con menor variación dentro de las épocas medidas.

Por otro lado, se realizó una comparación de medias con la prueba T-Student entre los tratamientos T2 con comportamiento normal las 12 y 15 horas, entre R1 y R2 (anexo 8), presentando diferencias significativas entre sí. Confirmando la teoría de que se manejaron distintas láminas de riego que el suelo retuvo durante todas las tres horas del día analizadas con una diferencia constante según la cantidad de riego aplicado. Lo que también obtuvieron Kumar et ál. (2007), en la respuesta de la cebolla (*Allium cepa* L.) a diferentes niveles de riego. Sin embargo, la mayoría del tiempo todos los tratamientos estuvieron dentro de los rangos óptimos de humedad

Este método presenta una falencia de detección de estrés hídrico desde el inicio de la disminución del riego. Dado que en el ensayo se regó durante el primera mes con el mismo tiempo de riego en todos los tratamientos el sensor de humedad del suelo no evidencio el cambio hasta después del día 20 donde el cultivo se expuso a condiciones ambientales extremas hasta el día 30. Días donde los sensores se estabilizan con el ambiente y comenzaron a monitorear la cantidad de agua aplicada en el momento y no el agua de almacenamiento que tenía.

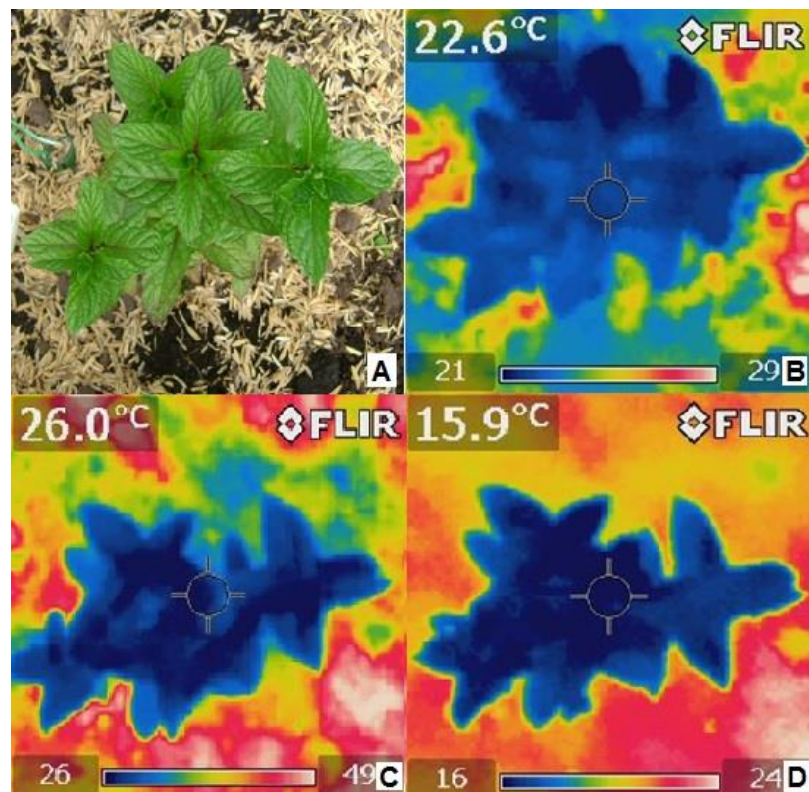
### **3.4 Imágenes termográficas como método propuesto para la detección de estrés hídrico**

#### **3.4.1 Comportamiento térmico del cultivo frente a las variaciones de riego.**

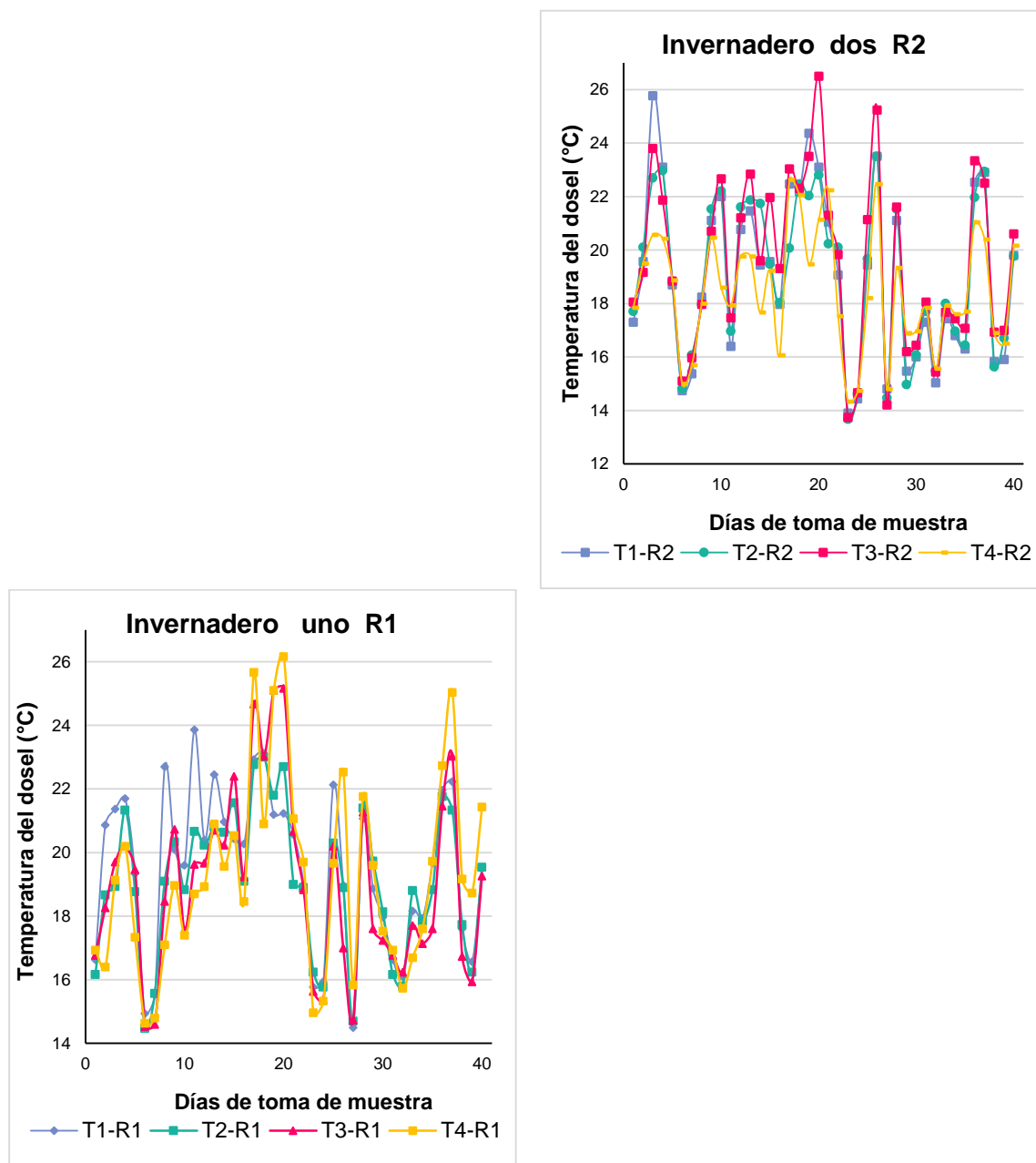
Por medio del registro de imágenes termográficas IT con la cámara termográfica FlirSystems®, se estimó la temperatura del dosel de la planta ( $T_d$ ) con el propósito de calcular el estado de estrés hídrico de las plantas y comparar este método con los tradicionales para manejar la gestión óptima del riego de los cultivos. Para esto, se describió y analizó el comportamiento de los diferentes tratamientos de riego a distintas horas del día: 9 de la mañana, 12 del mediodía y 3 de la tarde (Ilustración 3-4) para los dos invernaderos R1 Y R2., encontrando diferencias en la respuestas de los tratamientos de riego T1, T2, T3 y T4, según la hora del día y entre el comportamiento de los mismos según el invernadero.

En las figura 3-12, se presenta la variación de la temperatura del dosel ( $T_d$ ) tomada con la imagen termográfica, para los cuatro tratamientos de riego analizados en los dos invernaderos presentados las 9 de la mañana. En R1 se presentaron los mayores picos de temperatura del dosel en la plantas regadas por el tratamiento T4y en R2 fueron las plantas regadas con el tratamiento T3. Lo que concuerda con lo expresado Suazi Wang et ál. , (2010), quienes enfatizan en la teoría de que cuando las plantas tienen una deficiencia de agua en el suelo y presentan un estrés hídrico, evitan perder agua por transpiración y cierran sus estomas aumentando su temperatura. Luego, la temperatura ( $T_d$ ) del dosel aumenta a medida que disminuye el porcentaje de lámina de riego.





**Ilustración 3-4: A. Imagen fotográfica de la hierbabuena, B. Imagen termográfica a la 9 de la mañana, C. Imagen termográfica 12 del mediodía, D. Imagen termográfica 3 de la tarde. Tratamiento T1 en R2. (Fuente: Propia.)**



**Figura 3-12: Temperatura del dosel para R1 y R2 a las 9 de la mañana.**

Para los cuatro tratamientos se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , donde se encontró que el único tratamiento que no presenta un comportamiento similar a la distribución normal fue el tratamiento de riego T2. Para el caso de R1 solo se encontró diferencias significativas entre las temperaturas del dosel del tratamiento T1 y del tratamiento T2 por la prueba T-Student con un nivel de significancia del de 5%. Mientras

que en R2, se encontraron diferencias significativas entre todos los tratamientos analizados para un nivel de significancia del 5% para la comparación de medias de relacionadas de la prueba T-Student. Teniendo en cuenta que se descartó una comparación con el tratamiento T2 que no presenta un comportamiento similar a la distribución normalidad (Anexo B).

Teniendo en cuenta estas diferencias de la temperatura de las hojas medida a las 9 de la mañana, presentadas entre los tratamientos de riego para los dos invernaderos R1 y R2, se puede afirmar que la temperatura del dosel de las plantas en la mañana se ven claramente afectadas por la variación del porcentaje del riego y que dependiendo de las condiciones climáticas existe una diferencia significativa de esta condición entre los tratamientos de riego T1 y T2 para R1. Este comportamiento concuerda con el encontrado por Bellvert et ál. (2013), sumándole a esto que en horas de la mañana se presentan las menores temperaturas del dosel en las plantas para todos los tratamientos debido al efecto de refrigeración que provoca la transpiración.

En las figura 3-13, se presenta la variación de la temperatura del dosel de los cuatro tratamientos de riego analizados en los dos invernaderos presentados las 12 del mediodía. En estas horas del mediodía la temperatura del dosel de las plantas aumenta notablemente en comparación a las temperaturas presentadas en la mañana y la tendencia de comportamientos todos los tratamientos es similar como lo muestran las gráficas para las dos repeticiones.

Estadísticamente todos los tratamientos de R2 no presentan un comportamiento similar a una distribución normal según la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para  $n < 50$ .

Realizando un comparación de medias T-Student de los tratamientos de riego para R2 de las 12 del medio día se encontró que en R1 existen diferencias significativas entre las respuestas al riego por la temperatura de la hoja de la planta entre el tratamiento uno T1 y los tratamiento T3 y T4 respectivamente, con un nivel de significancia del 5% (Anexo B).

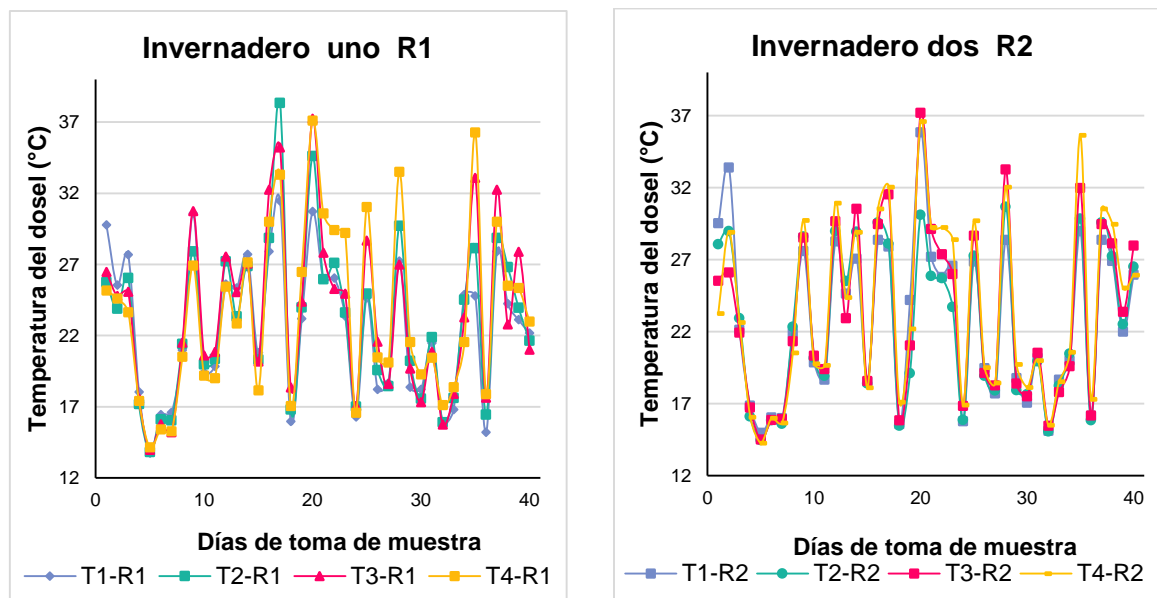


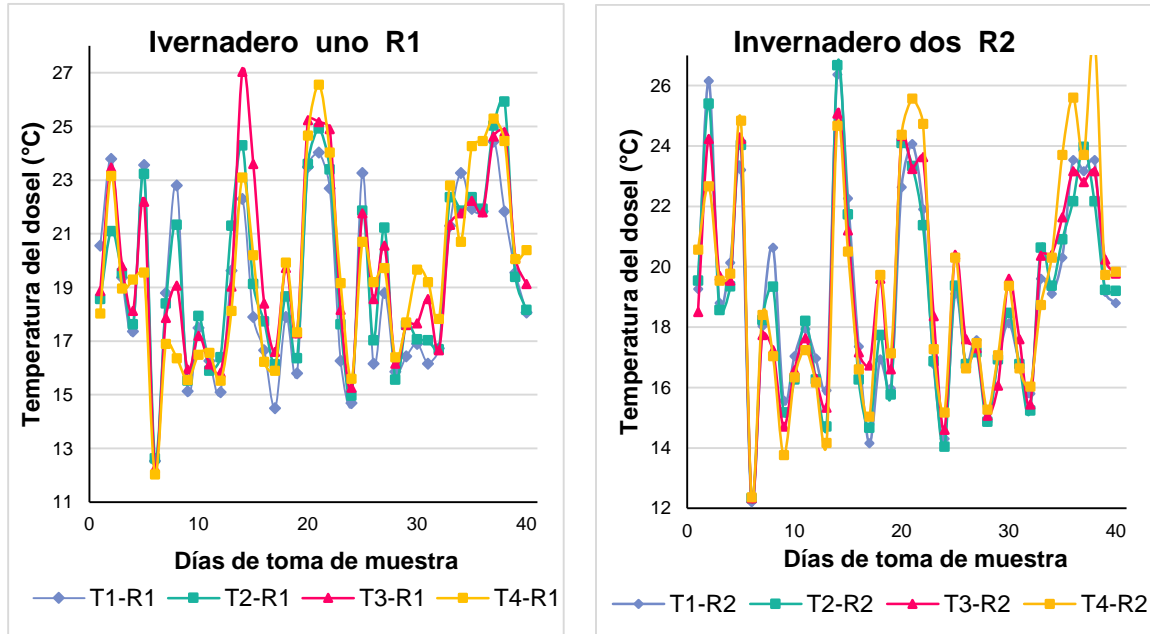
Figura 3-13: Temperatura del dosel para R1 y R2 registradas a las 12 del mediodía.

Para la figura 3-14, se presenta nuevamente una disminución de temperaturas del dosel similares en el rango de las medidas obtenidas a las 3 de la tarde para ambas repeticiones. Así, los aumentos de temperatura del dosel al medio día se dan cuando la radiación solar es absorbida, y en la tarde se enfría cuando esa energía se utiliza para evaporar el agua (energía latente o transpiración) en las superficies de calefacción de la planta (estomas) (Kendall et ál. , 2015).

Según el análisis estadístico de normalidad Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , para los datos de la 3 de la tarde, el único tratamiento que no presenta un compartimiento similar a la distribución normal fue el tratamiento T1 del invernadero R1. Donde, según la prueba T-Student para muestras relacionadas no existen diferencias significativas entre los tratamientos: T2 con respecto a T3 y T4 y entre ellos en R1, descartando T1 por normalidad y de los tratamientos T1 con respecto a T4 y de T2 con T3 y T4 y entre T3 y T4, con un nivel de significancia del 5% (Anexo B).

Luego, el comportamiento presentado a las tres horas del día concuerda con la curva diurna que sigue la temperatura del dosel nombrada por Lin *et al.*, (2012) y Zhou *et al.*, (2005) , donde se explican las temperaturas diurnas crecientes debido al aumento de la radiación solar y la temperatura del invernadero y una disminución proporcional de las

mismas por ambos factores y el proceso natural de transpiración de las plantas en horas de la tarde.



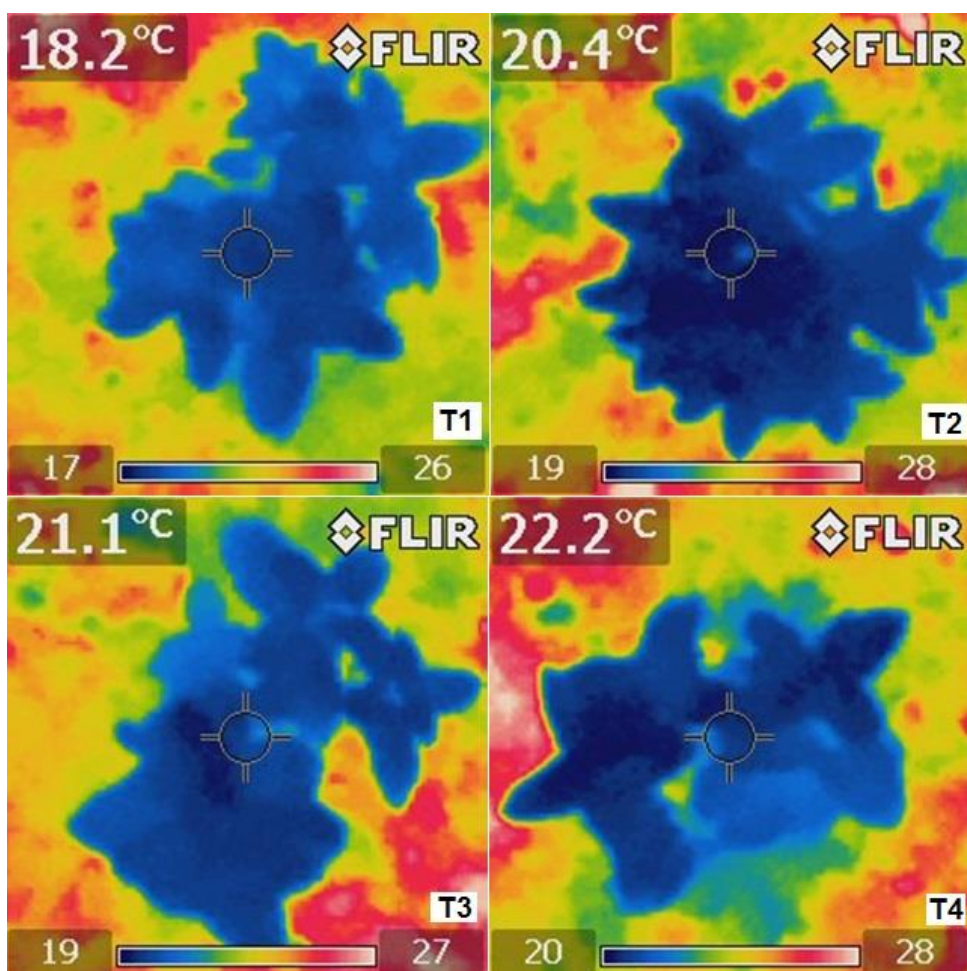
**Figura 3-14: Temperatura del dosel para R1 y R2 a las 12 del mediodía.**

De igual forma, realizando un análisis general el comportamiento de la temperatura del dosel de la plantas durante los primeros 10 días, se evidenciaron diferencias mínimas entre los tratamientos, lo que indica la recuperación de la tensión tras el riego en todos los casos durante esta época, y en los días posteriores un aumento de los niveles de estrés hídrico dado por la temperatura del dosel. Tendencia que concuerda con Patel et ál., (2001) quien realizó un estudio en Pigeonpea (*Cajanus cajan (L.) Millsp*) detallando durante 9 días las diferencias de riego. Donde los primeros dos días no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos que si se presentaron en los días posteriores.

Lo que permite afirmar que sí existe una diferencia entre las temperaturas entre tratamientos de riego para la hierbabuena en cada invernadero que se evidencia luego de 10 días, lo cual puede ser utilizado como guía para el manejo controlado del riego teniendo en cuenta la temperaturas (Td) tomadas mediante imágenes termográficas, que evidencian un estado de estrés diferente según las necesidades hídricas del cultivo.

### 3.4.2 Índice de estrés hídrico CWSI

El *CWSI* es un índice de estrés hídrico del cultivo que se calculó con las medidas in situ de las temperaturas de del dosel ( $T_d$ ) para cada tratamiento T1, T2, T3 y T4 (Ilustración 3-5) de cada invernadero R1y R2, usando la cámara termográfica. Calcular este índice según la ecuación expuesta en la metodología, que manejaron varios autores en experimentos similares al propuesto en el presente trabajo, permite manejar una escala de 0 a 1.0. Donde cero 0 indica que no hay estrés hídrico y el valor de 1.0, indica el máximo estrés.



**Ilustración 3-5: Diferencias entre los tratamientos para las temperaturas medias del dosel ( $T_d$ ) medidas a las 12 del mediodía en el invernadero R2. (Fuente: Propia)**

En la figura 3-15 se puede observar el comportamiento del (*CWSI*) para las diferentes horas. En ellas se nota una particularidad que no se había presentado o notado antes con

los demás métodos directos, y es que al inicio del ciclo de cultivo, cuando se aplicaron los diferentes tratamientos, el tratamiento T1 de a las 9 de la mañana en los dos invernaderos presentó valores cercanos a 1 y en ocasiones fue igual a 1, mientras que el tratamiento T4 estuvo por debajo de los 0.5. Lo que cambió luego de presentarse el periodo de máximas temperaturas ( $T_a$ ) donde los tratamientos presentaron un comportamiento de estrés hídrico al esperado y expresado por los demás métodos de detección de estrés: T1 cercano a 0 y T4 cercano a 1.

Realizando un análisis estadístico para los datos de CWSI con la prueba de normalidad de Shapiro-wilk para muestras menores de 50, se encontró con un grado de significancia de 0.05 que a las 9 de la mañana el único tratamiento que no tiene un comportamiento similar a la distribución normal es T4 de ambas repeticiones. De igual forma, todos los tratamientos a las 12 del medio día de R2 no cumplen esta característica y al igual que los tratamientos T1 de R1 y T3 y T4 de R2 a las tres de la tarde. Por lo cual, estos tratamientos se descartan para realizar la siguiente prueba paramétrica de correlación lineal con las demás variables medidas de temperatura del dosel  $T_d$ , conductancia estomática  $g$  y potencial matricial del suelo  $\Psi_{ms}$ .

Las variaciones del CWSI cercanas a 0 para T1 y T2, y cercanas a 1 para T3 y T4, concuerdan con S. Metin Sezen *et al.*, (2014), quienes realizaron un experimento para determinar el efecto del estrés hídrico sobre el CWSI de los cultivos de riego por goteo para diferentes tratamientos, algunos de ellos contemplados como riego deficitario y otros en riego por surcos, en pimienta roja en la región mediterránea de Turquía. Donde, los valores CWSI aumentaron con el aumento de estrés hídrico y existieron variaciones CWSI en todos los tratamientos en el transcurso del día y los días evaluados, y el tratamiento de riego deficitario al 50 % tuvo el mayor CWSI. Y para los tratamientos de riego en general, los valores CWSI oscilaron entre 0,15 y 0,82 en 2010 y oscilaron entre 0,16 y 0,83 en la temporada de crecimiento de 2011.

Por otro lado, los comportamientos diferentes a la hipótesis inicial de que el T1 debe presentar valores cercanos a 0 de CWSI, implica el análisis profundo de las condiciones



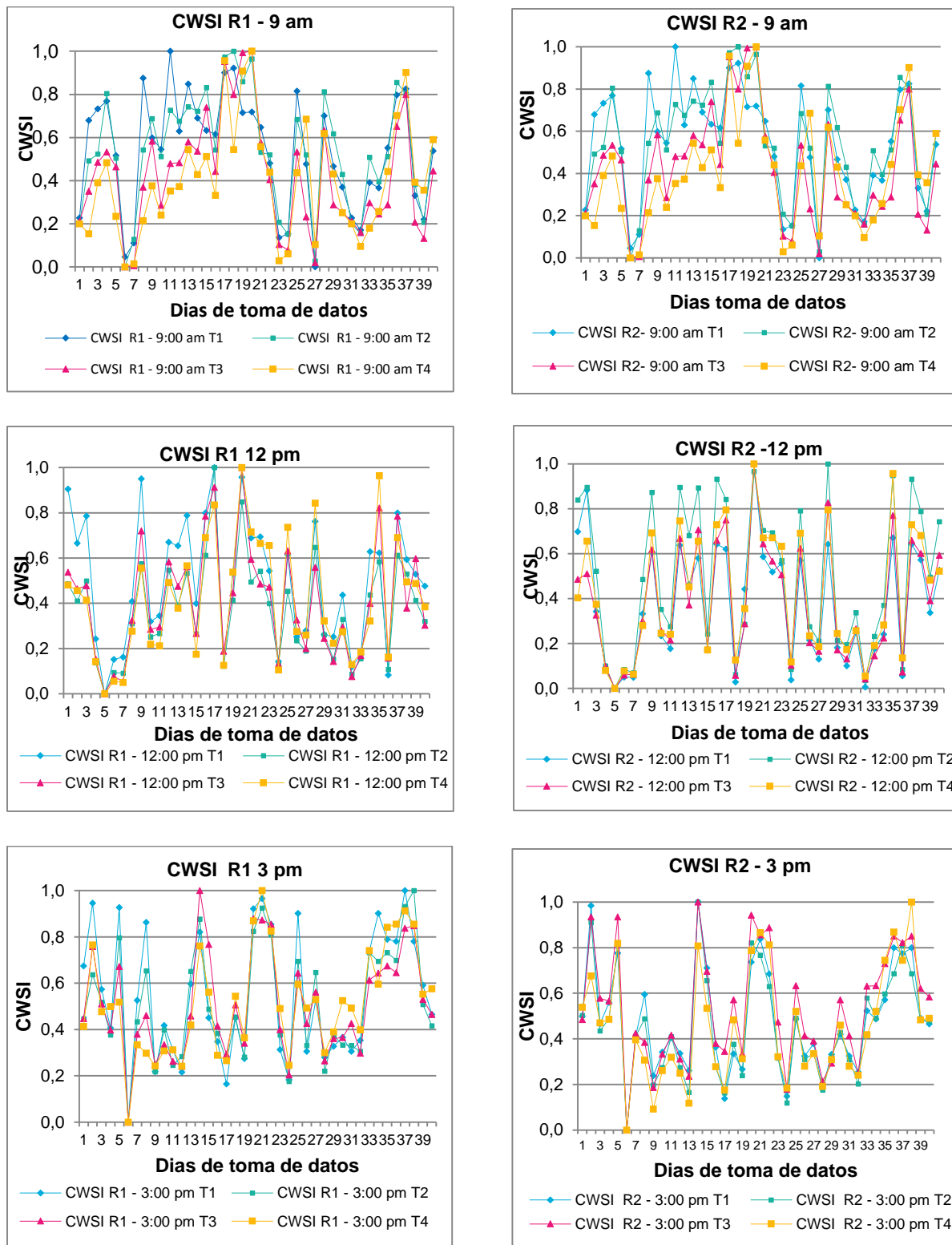


Figura 3-15: Índice de estrés hídrico CWSI en ambas invernaderos a diferentes horas del día.



ambientales de la radiación y de la velocidad del viento que no se tuvieron en cuenta en este trabajo. Como es el caso de B. Barbosa da Silva y T.V. Ramana Rao (2005) quienes realizaron una investigación con el objetivo de evaluar las variaciones diurnas y estacionales del índice de estrés del cultivo CWSI, con base en el balance energético a nivel de dosel del cultivo de algodón. Donde en un análisis de CWSI frente al tiempo para dos parcelas presentaron comportamiento distinto, ya que en una de ellas después del riego los valores CWSI disminuyeron notablemente respecto a la otra con una variación visible, probablemente asociada a las oscilaciones de las variables atmosféricas, tales como radiación neta y velocidad del viento.

El CWSI puede ser utilizado para controlar el estado hídrico de la planta y la planificación de la programación del riego para los cultivos. Para utilizar el CWSI como método de programación de riego N.K. Gontia, K.N. Tiwari (2008), al igual que Barbosa da Silva y T.V. Ramana Rao (2005), concluyeron que CWSI debe mantenerse por debajo de 0,3 para no interferir en el nivel de rendimiento del cultivo óptimo.

En ese caso para la hierbabuena (*Mentha spicata*) se tuvieron en cuenta los tratamientos que obtuvieron los mejores rendimientos de cultivo (T2 en R1; T1 y T2 en R2). Teniendo en cuenta que en el tratamiento T2-R1, más del 90 % de los datos de CWSI encontrados oscilaron entre 0.2 y 0.8 a las 9 de la mañana, entre 0 y 0.6 a las 12 del mediodía y entre 0.2 y 0.8 a las 3 de la tarde, se recomienda realizar un riego en R1 máximo cuando CWSI se encuentra entre en 0.6. Para el caso de R2 donde CWSI para T1 osciló todo el tiempo entre 0.1 y 0.8, se debe regar cuando CWSI es igual a 0.8. Se debe tener en cuenta que estos dos índices aplican para esta variedad de cultivo en la condiciones ambientales propuestas y en con la lámina riego indicada.

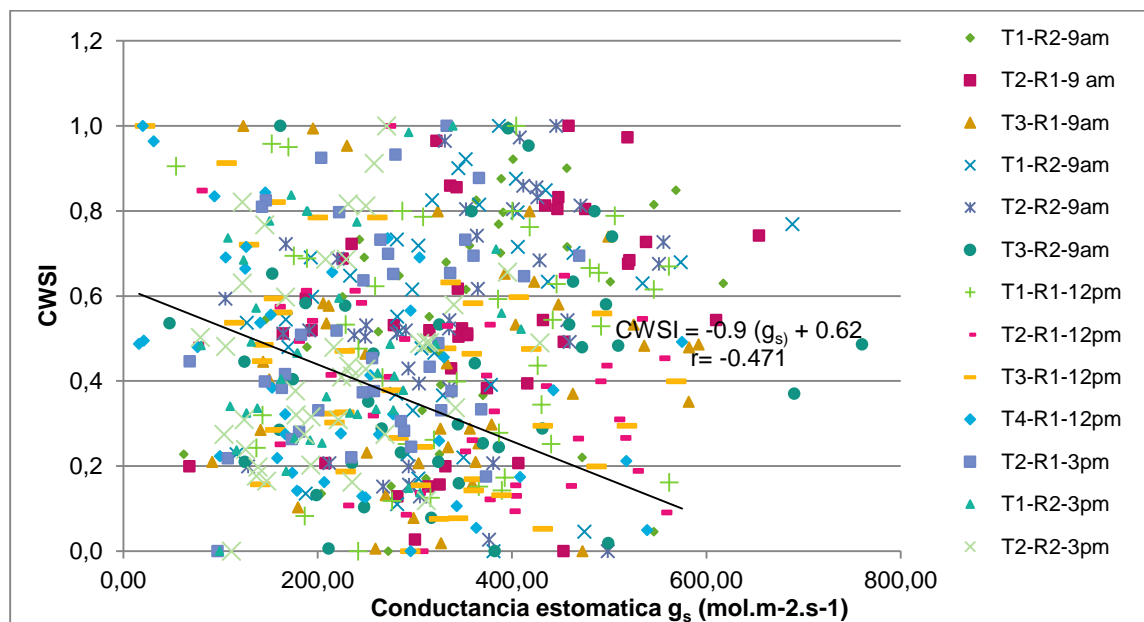
### **3.5 Correlación entre los métodos de determinación de estrés hídrico.**

Con el propósito de comparar y relacionar los métodos tradicionales de detección de estrés hídrico: conductancia estomática (gs) y potencial matricial de suelo ( $\Psi_{ms}$ ), con el método propuesto de imágenes termográficas que detectan la temperatura del dosel  $T_d$  y se normalizan por medio del CWSI. Se relazaron distintas correlaciones lineales que mostraron la independencia de los métodos dada por el enfoque de medición de cada uno de ellos en el Sistema agua-suelo-planta-ambiente.

### 3.5.1 Índice CWSI o Td vs conductancia estomática

Como se ha mencionado, el estrés hídrico en las plantas provoca un cierre estomático y por lo tanto una reducción en la tasa de transpiración que se traduce en un incremento de la temperatura de la cubierta vegetal. Este aumento de temperatura del dosel Td se monitoreó por medio de imágenes termográficas y se normalizó mediante el CWSI, mientras que la apertura y cierre estomático se registró mediante la conductancia estomática  $g_s$ .

En la figura 3-16 se puede observar la correlación obtenida entre CWSI y  $g_s$ , en el cual se muestra un alto grado de dispersión entre los dos que no se puede describir en un claro comportamiento de relación entre los dos.

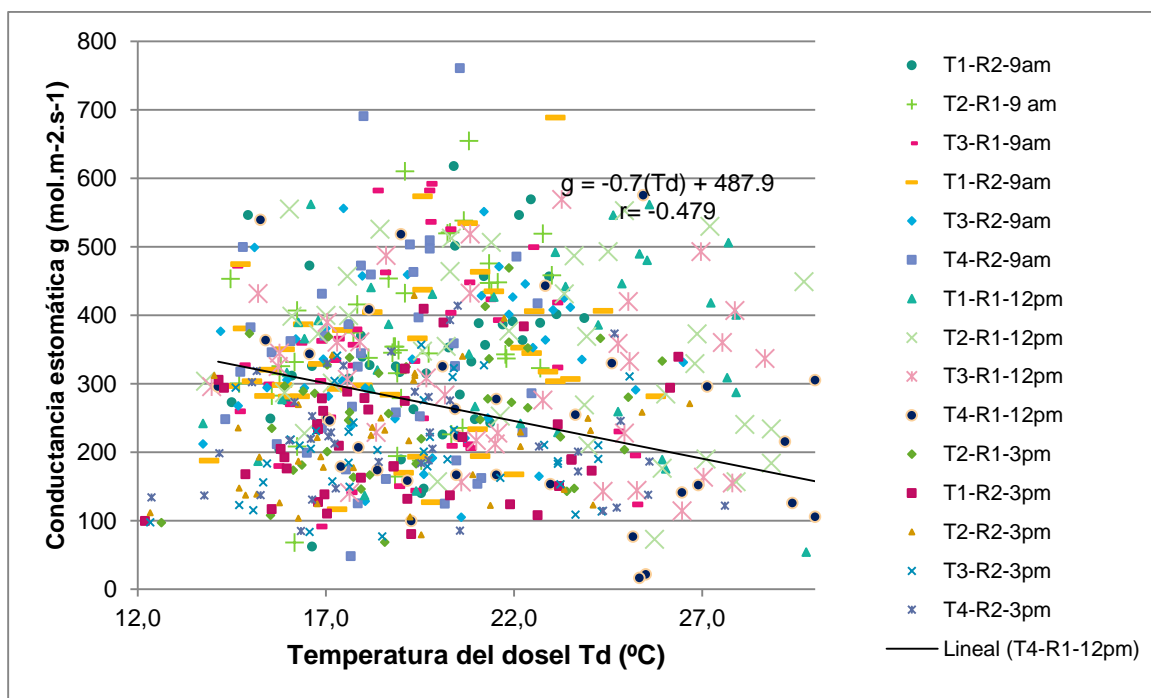


**Figura 3-16: Relación índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs, conductancia estomática  $g_s$**

De igual forma, realizando un análisis estadístico de correlación de Pearson lineal todos los índices encontrados para los tratamientos analizados fueron bajos, algunos con pendientes negativas y otros con pendientes positivas. El caso del tratamiento T3 de R1 a las 12 del medio día fue el que mostró un mayor ajuste con  $r=-0.471$ , con una recta de pendiente negativa que indica que a medida que disminuye CWSI y se acerca a 0 las plantas tienen una mayor conductancia estomática, transpiran más y no están estresadas.

En este caso Pou *et al*, (2014), analizaron la relación entre la variación de la conductancia estomática respecto CWSI calculado por varios métodos a partir de mediciones de imágenes térmicas para Vid. Encontrando índices de correlación de Pearson negativos entre  $-0.62$  y  $-0.79$  y ecuaciones de la recta con pendiente negativa pero mayor a la encontrada para Hierbabuena (*Mentha spicata*). Atribuyeron los altos índices de correlación a la influencia de la radiación PAR poco variable y decreciente durante las épocas de medición. Así, como una razón para los coeficientes de correlación más bajos a un el posible cambio en  $g_s$  entre el tiempo de formación de imágenes térmicas y las mediciones porómetro.

Sin embargo, buscando un mayor ajuste se realizó la misma correlación de  $g_s$  directamente con  $T_d$  como se muestra en la figura 3-17 donde la dispersión presentada en grafico anterior se centraliza un poco, pero el comportamiento entre estas dos variables sigue siendo confuso a simple vista.



**Figura 3-17: Relación conductancia estomática  $g_s$  VS, Temperatura del dosel  $T_d$ .**

Realizando el análisis estadístico de la correlación lineal por medio del coeficiente de Pearson se encontró para el tratamiento T4 de R1 al medio día, un índice similar al dado por la correlación de CWSI y  $g_s$ ,  $r=-0,479$  con una recta pendiente menor pero igualmente negativa. Lo que afirma la conclusión de que el CWSI concuerda con el estado de estrés

de la planta frente a sus necesidades hídricas, ya que a media q esta se encuentra más estresada menos es su apertura estomática.

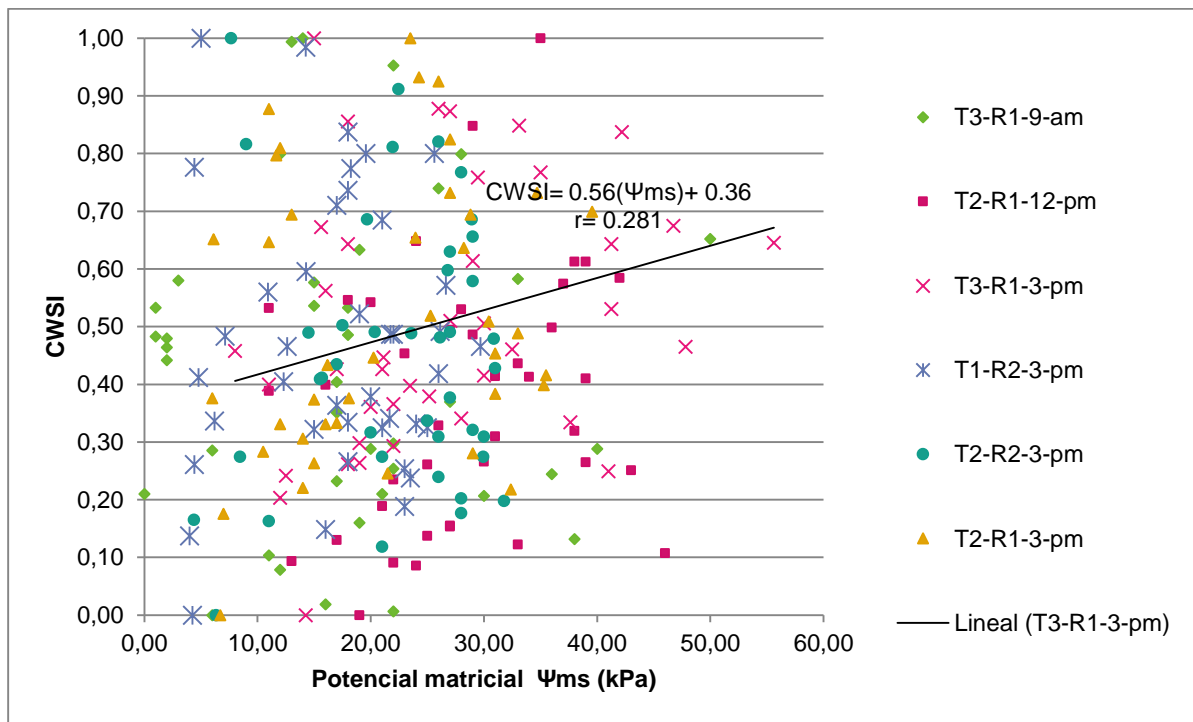
En este sentido Gómez-Bellot *et al*, (2015), muestran una relación negativa entre la  $T_d$  y  $g_s$  significativa en dos terrenos regados con agua de diferente salinidad para Japónica *Euonymus* la mayor parte del día, especialmente al mediodía. Quienes además, atribuyen la caída  $T_d$  al mediodía en algunos de los días analizados a un ligero descenso del DPV, lo que sugiere que la temperatura de la hoja es altamente dependiente de las condiciones atmosféricas tanto la temperatura ambiental  $T_a$ , como la humedad relativa HR y la Radiación incidente.

En el caso de la hierbabuena el ensayo se realizó durante dos meses en los que se presentaron en el primer mes varios días de nubosidad con bajas temperaturas ambientales  $T_{ap}$  en todas la horas del día analizadas, contrario al segundo mes, donde al medio día se presentaron las más altas  $T_{ap}$  y en horas de la tarde las más bajas  $T_{ap}$ . Lo que coincide con variabilidad ambiental expresada por varios autores la cual interfiere en la correlación del CWSI y  $T_d$  con  $g_s$ , que aunque presentó el comportamiento esperado no es contundente en los índices estadísticos encontrados pero que no descarta el método de la imágenes termográficas como método en la detección del estrés hídrico del cultivo.

### 3.5.2 Índice CWSI o $T_d$ vs potencial matricial del suelo

Analizando la relación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), que expresa la cantidad de agua en las diferentes etapas de crecimiento según la variación del clima, con el potencial matricial del suelo  $\Psi_{ms}$  que se basa precisamente en las características del suelo y su capacidad de retención del agua, sin importar la respuesta del cultivo a las condiciones a las cuales se encuentra expuesto, se aprecia en la figura 3-18 el patrón esperado pero con gran dispersión. Adicionalmente, al realizar el análisis de correlación entre estas variables, los índices de Pearson que se obtuvieron fueron muy bajos comparados con el resto de correlaciones (Anexo B), presentando el índice más alto el tratamiento T3 en R1 a las tres de la tarde de ( $r=0.281$ ). Por el contrario, el mismo tratamiento en el mismo invernadero en horas de la mañana obtuvo el menor índice de correlación de Pearson encontrado ( $r=0.005$ ).

Lo anterior difiere de lo que analizaron R. López- López *et al.*, (2009) para el caso del tomate con cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.), ya que en la relación de disponibilidad de agua con el CWSI, el tratamiento de 40 % de la lámina de riego presentó los valores más altos de CWSI, donde a medida que disminuyó la disponibilidad de agua para la planta, el índice aumentó, concluyendo en este estudio que el CWSI aumenta linealmente cuando disminuye el potencial mátricial., Es decir, cuando el suelo se seca en forma gradual. Resultados similares fueron obtenidos por Erdem *et al.* (2005), quienes demostraron que los valores del CWSI se incrementaron con la disminución del contenido de humedad del suelo, obteniendo índices de correlación mayores, cercanos a 0.8.



**Figura 3-18: Relación índice de estrés hídrico del cultivo Vs. Potencial mátricial del suelo  $\Psi_{ms}$ .**

Esto podría explicarse por la elevada variación de condiciones ambientales presentada a la misma hora todos los días durante el tiempo del ensayo, dada probablemente la tendencia decreciente durante las mañanas y las tardes de la temperatura de cultivo ( $T_d$ ) en todos los tratamientos, y que infiere en el cálculo de CWSI por el método de utilización de las superficies de referencia.

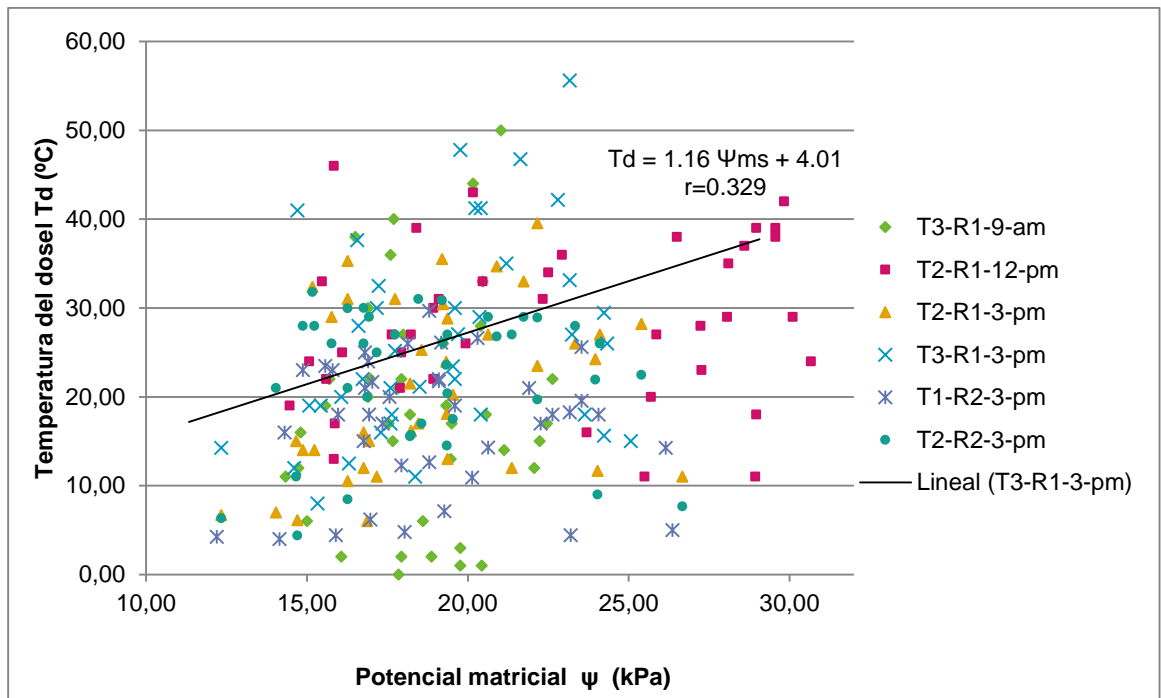
Luego el cultivo se ve influenciado según los tratamientos de riego que se ven afectados a lo largo del día por las condiciones climáticas y se expresa de distintas formas (aumentan o disminuye) en el dosel de la planta y en la forma como esta toma agua según la disponibilidad de la misma en el suelo.

Aunque los índices de correlación encontrados para el cultivo de hierbabuena (*Mentha spicata*) entre CWSI y  $\Psi_{ms}$  son bajos, el comportamiento similar encontrado por varios autores no descarta la utilización de este método para la detección de estrés hídrico. Pero plantea la importancia que se le debe tener la influencia de los factores ambientales en las dos variables, en especial, en el potencial matricial  $\Psi_{ms}$  y la variabilidad del porcentaje de riego.

Sin embargo, para tener una mejor aproximación y teniendo en cuenta que CWSI está calculado a partir de  $T_d$  dada por los estomas según el estado hídrico de la planta, en la figura 3-19 se relacionó  $T_d$  con el potencial matricial del suelo, obteniendo que a medida que aumenta la temperatura del dosel  $T_d$  aumenta el potencial matricial del suelo  $\Psi_{ms}$ , con un comportamiento más ajustado y menos disperso que el de la anterior correlación.

Recientemente, González-Dugo *et al.* (2012) encontraron para almendro (Nombre científico), que este indicador de estrés hídrico a partir del potencial matricial  $\Psi_{ms}$  se debió principalmente a las diferencias en el contenido de agua del suelo, profundidad de enraizamiento y la distribución de riego; mientras que las condiciones ambientales no afectaron mucho la variación estacional de este indicador. Y donde lo contrario sucede con la variabilidad de la temperatura intra-corona que no varió entre los tratamientos de riego. Por lo tanto, este indicador no parece útil para detectar el estrés hídrico en plantas como frutales según este autor.

Comparando los índices de correlación de Pearson con los anteriormente obtenidos entre CWSI y  $\Psi_{ms}$  los nuevos fueron mayores pero no relevantes. En el caso del tratamiento T3 de R1 a las 3 de la tarde, la pendiente de la recta aumentó y por ende el coeficiente de correlación  $r=0.329$ .



**Figura 3-19: Relación temperatura del dosel  $T_d$  Vs, potencial matricial  $\Psi_{ms}$ .**

Aunque los resultados obtenidos de las relaciones de CWSI con  $\Psi_{ms}$ , y  $T_d$  con  $\Psi_{ms}$  para hierbabuena (*Mentha spicata*) no muestran la linealidad esperada, los resultados obtenidos están más de acuerdo con los reportados en la vid por Möller *et al.* (2007) o Grant *et al.* (2007) quienes encontraron que la variabilidad de temperatura del dosel  $T_d$  y del potencial matricial  $\Psi_{ms}$  según los diferentes tratamientos, variando según las condiciones ambientales y las necesidades fisiológicas de las plantas.

Luego, se puede afirmar que la utilidad de la temperatura de dosel  $T_d$ , medida con cámara termográfica, para la detección del índice estrés hídrico de la planta CWSI podría ser diferente en función de las especies de plantas. Pero es difícil encontrar una explicación a este comportamiento diferente entre cultivos, ya que muchas respuestas fisiológicas como la agregación de los estomas y la distribución angular de la hoja, entre otros, puede determinar la variabilidad de la temperatura de las hojas que presenten limitaciones de agua del suelo.

### 3.6 Efecto del clima en medición del estrés hídrico por diferentes métodos.

Para analizar la influencia del efecto clima dado por el déficit de presión de vapor (DPV), la temperatura ambiente ( $T_a$ ) y la humedad relativa (HR) en las respuestas fisiológicas de las plantas, se realizó un análisis con el coeficiente de correlación de Pearson (Programa SPSS) entre cada uno los tres métodos utilizados para la detección de estrés hídrico. La correlación simple bivariada está basada en la suposición de que las variables estudiadas tienen una aproximación a la distribución normal. Por tal razón, no se trabajó con aquellas variables de  $T_a$ , HR,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  que no presentaron un comportamiento similar a la distribución normal previamente.

De igual forma, se realizó un análisis estadístico de prueba de normalidad para los valores obtenidos de déficit de presión de vapor (DPV) y una comparación de medias entre esta característica para las dos repeticiones. Donde el (DPV) para las 9 de la mañana en R1 y a las 3 de la tarde en R2 no presentaron un comportamiento similar a la distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significancia del 5%. Luego, correlacionando los DPV de medio día para muestras relacionadas de T-student, se aprecia que estas presentan diferencias significativas que corroboran la hipótesis inicial que se ha manejado que R1 y R2 presentan microclimas diferentes (Anexo B).

Hasta el momento se han analizado de manera individual los métodos de detección de estrés hídrico de las plantas y el ambiente de desarrollo de los mismos. Sin embargo, se ha mencionado la influencia del clima en la respuesta a los tratamientos de riego demostrados por el comportamiento de éstos en dos ambientes protegidos distintos. Por tal razón, en este numeral se correlaciona el potencial hídrico matricial del suelo ( $\psi_{ms}$ ), la conductancia estomática ( $g_s$ ) y la temperatura del dosel ( $T_d$ ), cada uno con el déficit de presión de Vapor (DPV) definido por las relaciones psicrométricas entre la temperatura ( $T_a$ ) y la humedad relativa (HR) .

Esta correlación con déficit de presión de Vapor (DPV) permite tener un acercamiento real a la influencia que tiene el efecto clima en el comportamiento de los estomas, donde se evidencia el estado real de la planta. El cual se ve influenciado por el alta o baja demanda evaporativa. Adicionalmente se evidencia la relación agua suelo planta clima en todos los



métodos de detección de estrés hídrico, en especial en la temperatura del dosel medida con cámara termográfica, con lo que el método se validará a partir de este momento.

### 3.6.1 Conductancia estomática ( $g_s$ ) – Déficit de presión de vapor (DPV)

En la figura 3-20 se presenta el gráfico de dispersión del comportamiento de la conductancia estomática  $g_s$  en función del déficit de presión de vapor del (DPV). Donde se muestra que a mayor o menor tasa de transpiración provocada por el (DPV) existe una mayor o menor apertura estomática de las hojas de la hierbabuena (*Mentha spicata*) según la hora del día. Así, a las 9 de la mañana en R2 en especial por T4 y a las 3 de la tarde para R1, cuando (DPV) es menor, se presentaron los mayores ( $g_s$ ). Por el contrario, a las 12 del mediodía en R1 y R2, a mayores valores de (DPV) mayores fueron los valores de ( $g_s$ ) y a menor (DPV) menor fue ( $g_s$ ).

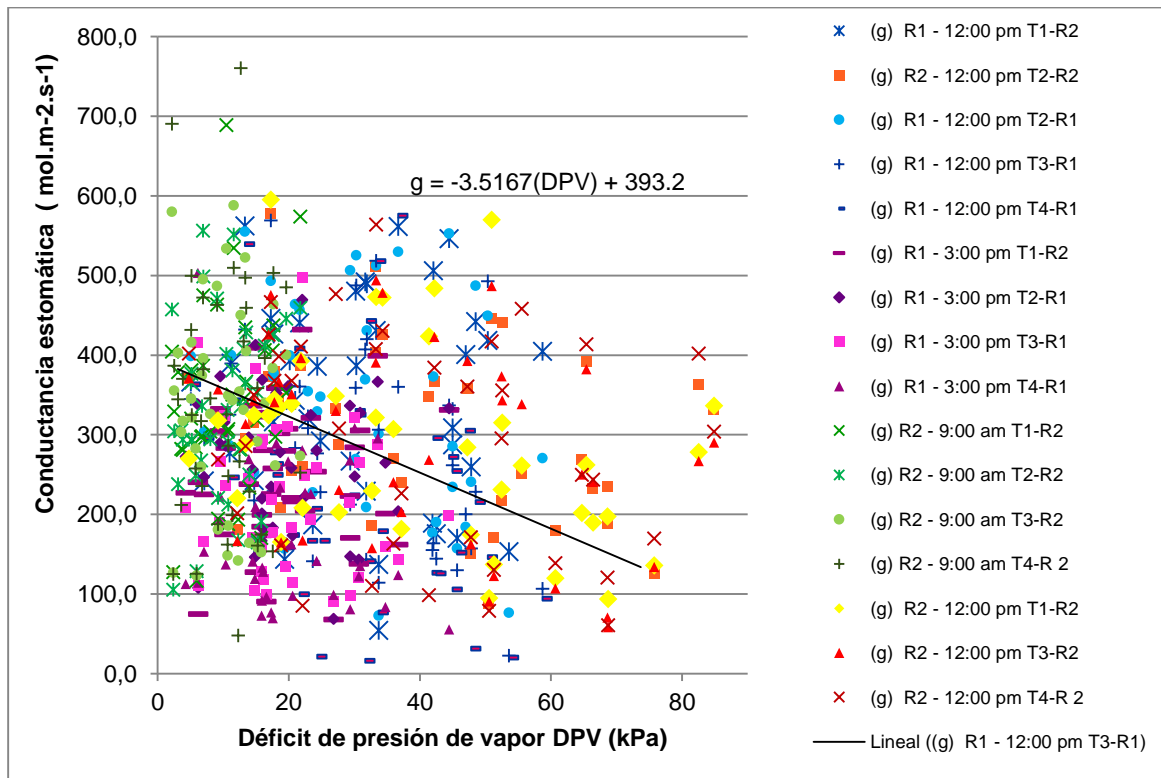


Figura 3-20: Conductancia estomática Vs. Déficit de presión de vapor en los dos invernaderos R1 y R2.

Dado que las plantas fueron expuestas a un estrés por sequía, el cultivo tiende a conservar la utilización del agua, luego cuando el déficit de presión de vapor atmosférico DPV es alto e implica una gran demanda en las plantas para transpirar, las plantas limitan el consumo de agua expresado en un cierre parcial de los estomas (Sinclair *et al.*, 2005, Fletcher *et al.*, 2007 y Kholova *et al.*, 2010).

Este rasgo de baja ( $g_s$ ) a alto (DPV), puede ocurrir con frecuencia alrededor del mediodía, y se traduce en dos beneficios. En primer lugar, disminuye la (DPV) media diaria eficaz para la transpiración que permite el uso más eficiente del agua disponible (Zongjian Yang *et al.*, 2012). En segundo lugar, el agua se conserva para su uso posterior en el periodo de de crecimiento. De esta forma, este comportamiento de las 12 del medio día concuerda con Bunce (1998), quien encontró que ( $g_s$ ) disminuye cuando (DPV) aumenta para las plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivadas en campo incluso a alta ( $\Psi_{ms}$ ) (-0,09 MPa) dado por la influencia del estado hídrico del suelo y déficit de presión de vapor atmosférico.

**Tabla 3-3: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta  $g_s$  de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		gs-T1	gs-T2	gs-T3	gs-T4
DPV-R1-12pm	Correlación de Pearson	-0.036	-0.258	-0.379*	-0.318*
	Sig. (bilateral)	0.827	0.108	0.016	0.046
DPV-R1-3pm	Correlación de Pearson	0.066	0.008	-0.111	-0.193
	Sig. (bilateral)	0.685	0.962	0.496	0.232
DPV-R2-9am	Correlación de Pearson	0.196	0.230	-0.063	-0.034
	Sig. (bilateral)	0.224	0.153	0.701	0.833
DPV-R2-12pm	Correlación de Pearson	-0.315*	-0.261	-0.343*	-0.237
	Sig. (bilateral)	0.048	0.104	0.030	0.141

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

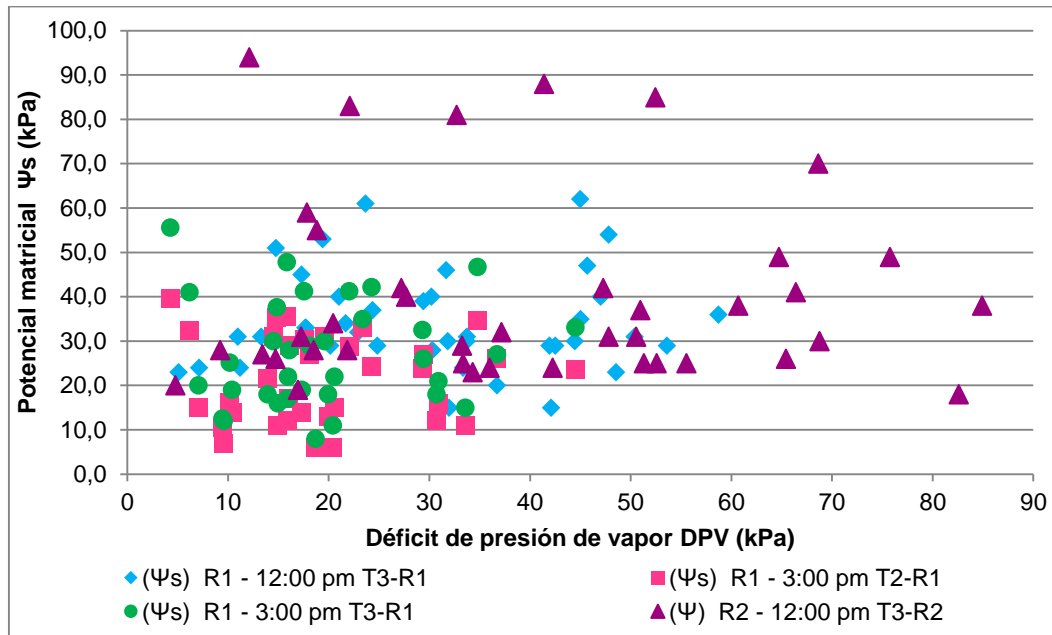
De tal forma, se realizó una correlación entre Conductancia estomática ( $g_s$ ) y Déficit de Presión de Vapor (DPV), utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ( $0 \leq r \leq |1|$ ) (Anexo C). Como se puede observar en la tabla 3-3, el mayor índice de correlación se presentó a las 12 del mediodía en R1 en el tratamiento T3 de 0.379 y el menor a las 9 de la mañana en R2 de 0.034 las cuales no son significantes al nivel 0,05 (bilateral). Dados estos resultados, se descartó una relación relevante entre (DPV) y ( $g_s$ ) en los invernaderos estudiados, y por el contrario se afirma que ( $g_s$ ) para la hierba buena (*Mentha spicata*) está influenciada por la transpiración de los estomas y no directamente por (DPV) como lo sugiere Monteith, (1995). Sin embargo, cuestiona la posibilidad que exista una relación de ( $g_s$ ) con la presión evaporativa directamente en R2 a las doce del mediodía donde todos los tratamientos presentan el mismo comportamiento de ( $g_s$ )

### 3.6.2 Potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) – Déficit de presión de vapor (DPV).

En la figura 3-21 se presenta el gráfico de dispersión que relaciona ( $\Psi_{ms}$ ) con (DPV) donde, dependiendo la hora del día y el invernadero R1 se puede observar a las 3 de la tarde en los tratamientos T2 y T3, que a menor (DPV) menor ( $\Psi_{ms}$ ). Sin embargo, en los tratamientos T3 de ambos invernaderos al medio día no existe una clara tendencia al aumento o disminución de ( $\Psi_{ms}$ ) dada por (DPV).

Estos resultados en el gráfico de dispersión lineal y el análisis estadístico concuerdan con Qingwu Xue *et al.*, (2004) quienes se encargaron de investigar el efecto del potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) en las respuestas de intercambio de gases con el (DPV) en cuatro cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) sembrados en el campo en invierno. Donde no encontraron una relación directa entre ( $\Psi_{ms}$ ) y (DPV), pero se relacionó la respuesta de (DPV) con la tensión por gravedad, cuando ( $\Psi_{ms}$ ) disminuyó y las plantas se sometieron a un estrés hídrico.

La restricción de transpiración por el cierre de estomas cuando existe un alto (DPV), se describe como el resultado de la limitación de la conductancia hidráulica en la planta, lo que limita el flujo de agua de las raíces a los sitios de transpiración en la superficie de la hoja (Brodrribb y Jordania, 2008, y Sinclair *et al.*, 2010). Luego, para la Hierbabuena (*Mentha spicata*) cuando mayor fue  $\Psi_{ms}$  y la planta estaba estresada, mayor fue su limitación de transpiración sin importar si VDP es mayor o menor.



**Figura 3-21: Déficit de presión de vapor Vs. Potencial matricial para ambas repeticiones**

**Tabla 3-4: Índices de correlación lineal de Pearson entre y los la respuesta de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		Ψs-T2	Ψs-T3
<b>DPV-R1-12pm</b>	Correlación de Pearson	-	0.040*
	Sig. (bilateral)	-	0.808
	N	-	40
<b>DPV-R1-3pm</b>	Correlación de Pearson	0.061*	0.043
	Sig. (bilateral)	0.708	0.794
<b>DPV-R2-12pm</b>	Correlación de Pearson	-	-0.022*
	Sig. (bilateral)	-	0.893

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

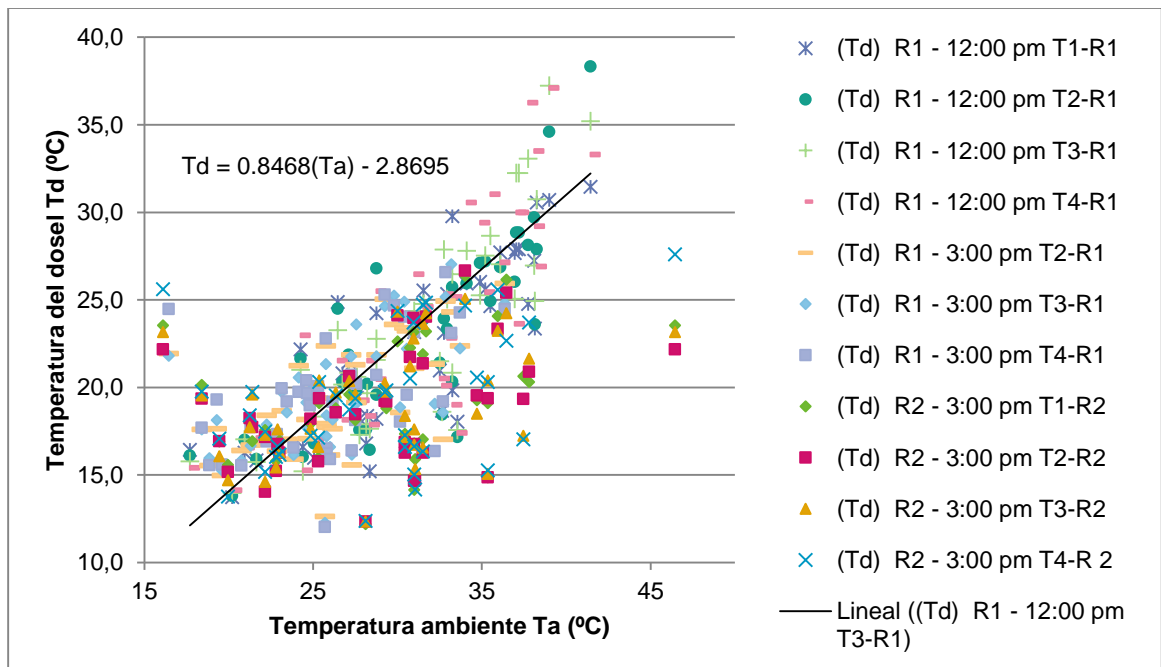
\* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Realizando la correlación entre (DPV) y ( $\Psi_s$ ), utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ( $0 \leq r \leq |1|$ ) como un índice para medir el grado de relación entre estas dos

variables en este experimento (Anexo B). Se puede observar en la tabla 3-4 el mayor índice de correlación se presentó a las 3 de la tarde en R1 en el tratamiento T2 de 0.061 y el menor a las 12 del mediodía en R2 de -0.022 las cuales no son significantes al nivel 0,05 (bilateral). De acuerdo con estos resultados se descartó una relación entre (DPV) y ( $\Psi_{ms}$ ) en los invernaderos estudiados para Hierbabuena (*Mentha spicata*).

### 3.6.3 Temperatura de dosel (Td) – Temperatura ambiente (Ta) – Déficit de presión de vapor (DPV).

En la figura 3-22 se puede observar el diagrama de dispersión entre la temperatura del dosel (Td) y la temperatura ambiente (Ta) para los dos invernaderos a diferentes horas del día. Este se diferencia de los anteriores, gracias al alto grado de relación entre estas dos variables que se evidencia en una de las rectas obtenidas y su respectiva ecuación para el tratamiento T2 a las 9 de la mañana en R1.



**Figura 3-22: Temperatura ambiente Vs. Temperatura del dosel para ambas repeticiones.**

Del mismo modo, se nota un diferencia marcada entre el comportamiento de estas dos variables entre los tratamiento de R1 y R2 a las 9 de la mañana. Donde en R1 que tiene

un plástico con condiciones normales de difusión de la luz y permite la relación lineal entre la respuesta de (Td) y (Ta) para todos los tratamientos. Y por el contrario en R2 la repuesta no tiene un claro comportamiento lineal donde las altas y bajas temperaturas (Ta) presentadas en el invernadero elevan y bajan respectivamente, de manera drástica las temperaturas del dosel (Td), modificando el comportamiento sin mostrar una tendencia clara en todos los tratamientos.

Realizando un análisis estadístico de la correlación lineal de (Ta) y (Td) (Tabla 3-5), se encontraron altos índices de correlación de Pearson para las 12 del medio día entre la respuesta de los tratamientos T3 ( $r=0.844$ ) y T4 ( $r=0.826$ ) para R1 que son significativas al nivel 0,01. Y por el contrario, se obtuvieron las menores correlaciones de las 3 de la tarde en R2 (T3,  $r=0.368$ ), lo que se explica recordando que durante las horas de la tarde se obtuvieron las menores temperaturas (Ta) luego de presentarse la mayores al medio día. Esta disminución de temperatura (Ta) no se refleja tan abruptamente en (Td) luego se esperarí que unas horas después esta relación se regula.

**Tabla 3-5: Índices de correlación lineal de Pearson entre Ta y los la respuesta Td de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		Td-T1	Td-T2	Td-T3	Td-T4
Ta-R1-12pm	Correlación de Pearson	0.808**	0.816**	0.844**	0.826**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000
Ta-R1-3pm	Correlación de Pearson	-	0.609**	0.610**	0.468**
	Sig. (bilateral)	-	0.000	0.000	0.002
Ta-R2-3pm	Correlación de Pearson	0.393*	0.378*	0.368*	0.384*
	Sig. (bilateral)	0.012	0.016	.020	0.014

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Estos resultados obtenidos a las 12 del mediodía en R1 concuerdan con Barrios-Gómez *et al.*, (2011) quienes obtuvieron correlaciones mayores de  $r=0.80$ , en el estudio del efecto

del déficit hídrico del suelo y temperatura alta del aire en las relaciones hídricas y temperatura del dosel del cultivo ( $T_c$ ), rendimiento de semilla (RS) y sus componentes en 8 variedades de frijol. Donde las plantas que tuvieron menor temperatura del dosel del cultivo  $T_c$  se relacionaron positiva y significativamente con la temperatura del aire  $T_a$ .  $T_c$  aumentó a medida que  $T_a$  se incrementó durante el periodo de medición entre las etapas, sobre todo en los ambientes de donde las plantas sufrieron niveles más altos de estrés hídrico.

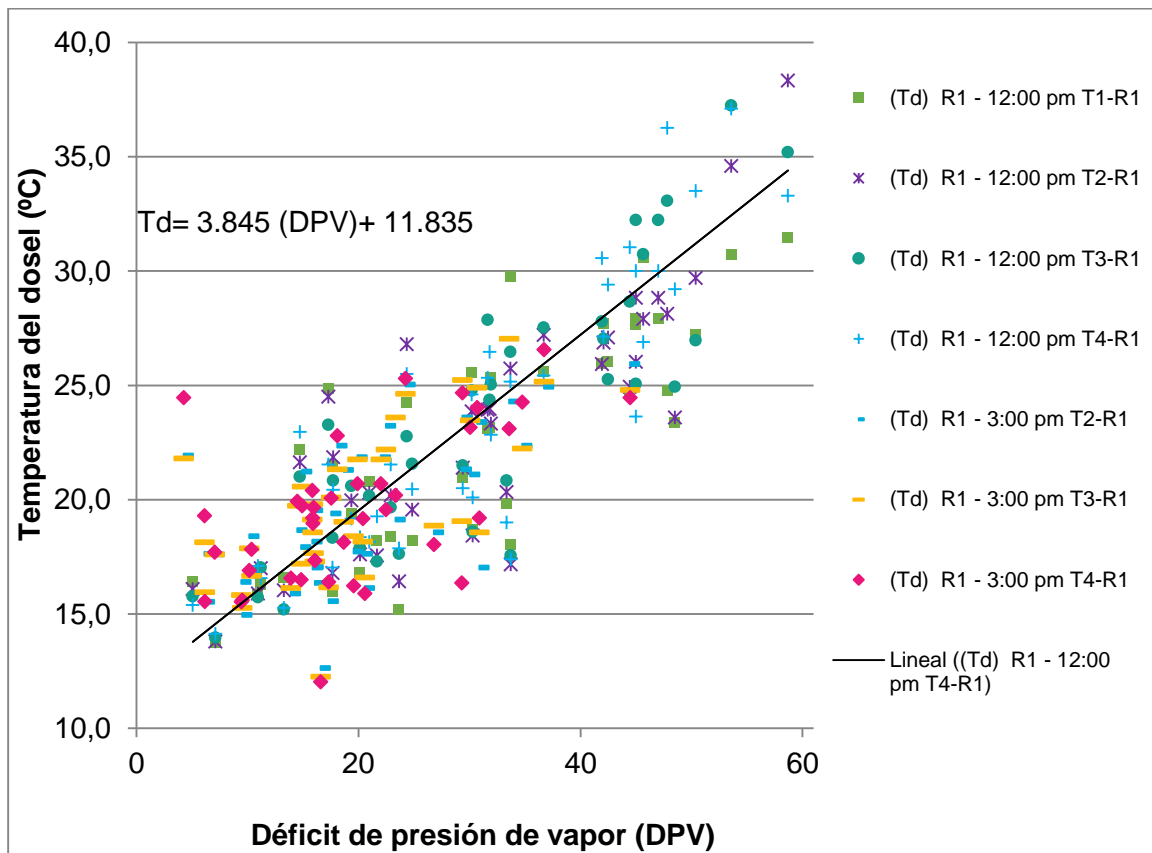
Por el contrario, Barrios Gómez *et al.*, (2011) obtuvieron resultados más bajos cercanos a  $r=0.60$  como los obtenidos en R1 a las 3 de la tarde. Ellos evaluaron en campo la respuesta a sequía, a altas temperaturas y su avance en el mejoramiento, de un grupo de cultivares de frijol tipo 'Flor de Mayo', midiendo la temperatura del dosel y explorando el efecto de temperaturas altas y de sequía en la intensidad del color verde en los folíolos (medida con el SPAD®) y en el área foliar específica.

La temperatura del dosel ( $T_d$ ) varía según varios factores climáticos y fisiológicos, sin embargo es sin duda la temperatura ambiente ( $T_a$ ) las que más influye en esta. Razón por la cual existe una relación lineal descrita por un comportamiento directamente proporcional donde a medida que aumenta ( $T_a$ ) aumenta ( $T_d$ ) siendo casi iguales al medio día, donde por las altas temperatura la planta se ve obligada a transpirar y presentar una apertura de estomas, lo contrario sucede en horas de la mañana y de la tarde donde ( $T_d$ ) es mayor  $T_a$  dado por una estrés de la planta por sequía donde la planta ( $T_d$ ) aumenta por falta de transpiración como método de defensa para no perder agua

De tal forma, los bajos coeficientes de correlación entre ( $T_d$ ) y ( $T_a$ ) durante la mañana y la tarde están dados por el estrés hídrico a la que están siendo sometidas las plantas. A altas temperaturas ambientales siempre se esperaría que la planta transpirara más, esto si tuviera las condiciones hídricas para hacerlo. Sin embargo, la escasez de agua en el suelo, causa que las plantas transpiren a una tasa menor que la demanda evaporativa de la atmósfera, lo que genera un calentamiento de la hoja mayor al de la temperatura ambiental dado por una disminuciones el efecto refrigerante de la transpiración.

En la figura 3-24 se presenta la temperatura del dosel ( $T_d$ ) y el déficit de presión de vapor (DPV) en un gráfico de dispersión, no se presenta una clara relación lineal en los tratamientos de R1 a las 12 del medio día donde a medida que aumenta (DPV) aumenta

Td. En R2 a las 3 de la tarde no es tan clara dicha linealidad pero se mantiene y a diferencia de los tratamientos a 9 de la mañana en R2 donde no es clara. Esta tendencia es similar a la relación (Td) y (Ta) y la ecuación encontrada de la recta no varía mucho respecto a la encontrada anteriormente.



**Figura 3-23: Temperatura del dosel Vs. Déficit de presión de vapor para ambas repeticiones.**

Del mismo modo, se realizó un análisis de correlación de Pearson (Tabla 3-6) encontrando los mayores índices las 12 del mediodía en R1 donde fue mayor para T4 ( $r=0.881$ ) y los menores tratamiento de las 3 de la tarde en R1 con la mayor correlación de la hora en el T3 ( $r=0.674$ ) son significativas al nivel 0,01. Estos índices concuerda con la misma correlación realizada anteriormente con la temperatura ambiente (Ta) sin embargo aumentan en un cierto grado según el tratamiento lo que permite afinar que existe un influencia en de la humedad relativa (HR) representada en (DPV) en la respuesta de Td



**Tabla 3-6: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta Td de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		Td-T1	Td-T2	Td-T3	Td-T4
DPV-R1-12pm	Correlación de Pearson	0.819**	0.849**	0.874**	0.881**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000
DPV-R1-3pm	Correlación de Pearson	-	0.642**	0.674**	0.563**
	Sig. (bilateral)	-	0.000	0.000	0.000

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

De esta manera, Yeşim Ahi, *et al.*, (2015) evaluaron la respuesta de los cultivos de semillon y razaki a la pérdida de agua, la temperatura atmosférica y el déficit de presión de vapor del aire (DPV) en la relación suelo-planta-atmósfera examinando estos factores para detectar el estrés hídrico de los cultivos. Respecto a esta correlación entre (Td) y (DPV) encontraron coeficientes de determinación lineal  $R^2$  similares a los obtenidos entre 0.83 y 0.59 que variaron según el porcentaje de riego, confirmando la hipótesis de que existe una relación directa entre estas dos variables que se ve afectada por el contenido de humedad del suelo

Del mismo modo, Urrego-Pereira *et al.*, (2013) realizaron un experimento para maíz (*Zea mays* L.) regado por aspersión con pivotes y compararon dos condiciones: húmeda y seca. Donde las diferencias entre tratamientos para la temperatura del aire (Ta) y (DPV) fueron significativas con una relación entre estas variables de 0,6 a 0,7. Y se justifican estos bajos valores porque en el riego una cantidad total de la radiación neta se traslada desde el entorno de la planta a las gotas de agua, las cuales se calientan y después de que impactan sobre el suelo y/o el dosel, lo que conduce a que se presenten pérdidas de agua de riego evaporación durante y después de la irrigación. Esta evaporación del agua modifica el microclima de los cultivos, disminuye la temperatura del aire y déficit de presión de vapor de aire (DPV).

Para el caso de la hierbabuena (*Mentha spicata*) la variación de la relación entre (Td) y (DPV) de los tratamientos y entre las mismas repeticiones, está al igual que el *semillon* y *razaki* influenciada por la cantidad de agua disponible en el suelo. Y al igual que el maíz (*Zea mays* L.) por la cantidad de radiación neta que cambia según el plástico del invernadero como se demostró anteriormente la cual infiere igualmente en la cantidad de riego por perdidas por evaporación, por ende en la transpiración

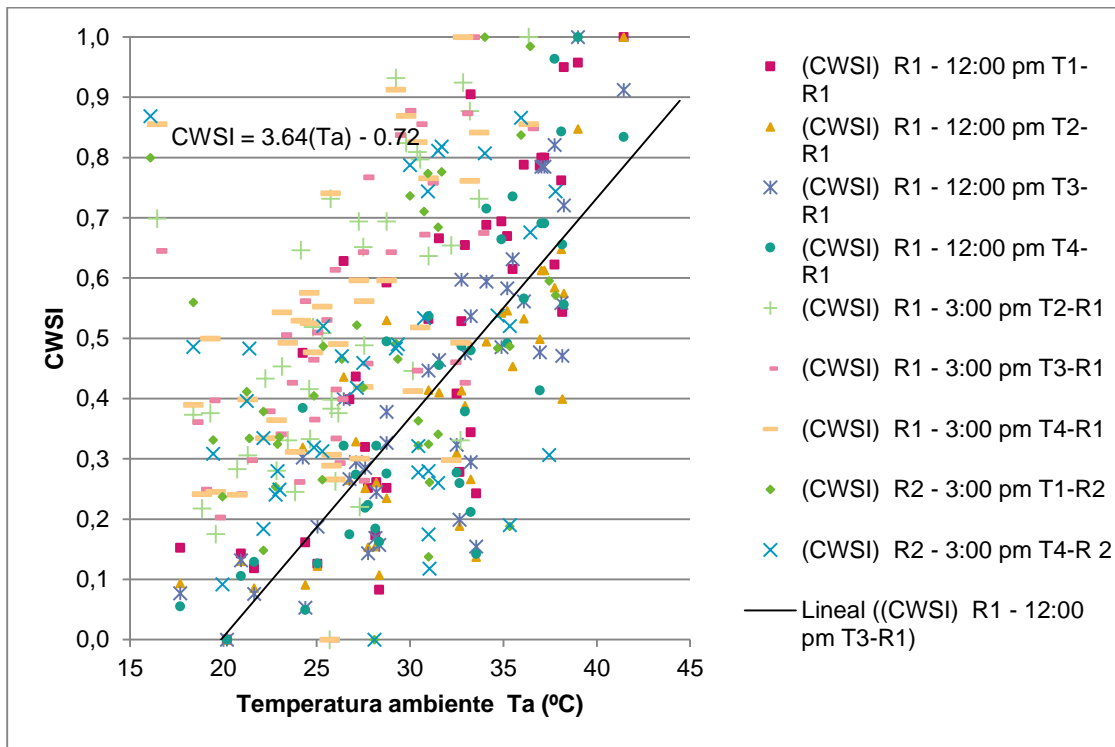
### **3.6.4 Índice de estrés hídrico CWSI – Ta - Déficit de presión de vapor**

Para este trabajo CWSI fue calculado teniendo en cuenta solo las medidas de la temperatura del dosel Td, sin embargo se debe tener en cuenta que CWSI no solo depende de Td sino también Ta y DPV, dado que CWSI es mucho más indirectamente sensible a otros factores meteorológicos de lo que algunos autores tiene en cuenta (S. Taghvaeian *et al.*, 2014). Por esta razón, a continuación se busca correlacionar dicho CWSI con la temperatura ambiente Ta y el déficit de presión de vapor DPV buscando los tratamientos que cumplan con dichas características.

En la figura 3-24 se encuentra el gráfico de dispersión que relaciona CWSI con Ta para los diferentes tratamientos que cumplen con la condición de normalidad en las tres horas del día de toma de datos y las dos repeticiones. En él se muestra un comportamiento similar de tendencia parcialmente lineal ascendente donde media que aumenta Ta aumenta CWSI. También se pueden observar casos aislados de bajas temperaturas datos de CWSI cercanos a 1 en horas de la tarde donde las plantas de hierbabuena (*Mentha spicata*) en horas de la mañana y el medio día estuvieron expuestas a altas temperaturas ambientales Ta que influyeron sobre dicho estado al final del día.

Del mismo modo se realizó un análisis de la posible correlación lineal dada por el coeficiente de Pearson expresado en la tabla 3-7. En el que se encontró una clara y alta correlación entre la temperatura Ta del medio día en R1 y los índices de estrés hídrico CWSI de todos los tratamientos de ese invernadero en especial con el tratamiento T3 con  $r=0.853$ , luego existe una relación directa entre el CWSI y Ta donde a medida que Ta aumenta CWSI aumenta de manera proporcional. Correlación que disminuye según la

intensidad de radiación del día que aumenta la temperatura  $T_a$  siendo menor a las tres de la tarde



**Figura 3-24: Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs. Temperatura del ambiente  $T_a$  para ambas repeticiones.**

El comportamiento presentado concuerda con Li *et al*, (2010) quienes relacionaron el CWSI con  $T_a$  y las respuestas con de flujo de calor latente y  $CO_2$ , las cuales no demostraron una relación consistente en trigo, para lo que lo sugirieron como una herramienta fiable cuantificación estrés hídrico. Pero para Maíz fueron más consistentes, por lo que CWSI es útil en la identificación y cuantificación de las condiciones de estrés de agua cuando existen los mayores picos de radiación neta. Luego cuando CWSI se calcula se deben tener en cuenta las diferentes condiciones de radiación y la velocidad del viento para poder se puede utilizada para la programación del riego y gestión del agua agrícola del maíz.

**Tabla 3-7: Índices de correlación lineal de Pearson entre  $T_a$  y los la respuesta CWSI de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		CWSI T1	CWSI T2	CWSI T3	CWSI T4
Ta-R1-12pm	Correlación de Pearson	0.795**	0.825**	0.853**	0.824**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000
Ta-R1-3pm	Correlación de Pearson	0.594**	0.617**	0.475**	0.594**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.002	0.000
Ta-R2-3pm	Correlación de Pearson	0.398*	-	-	0.375*
	Sig. (bilateral)	0.011	-	-	0.017

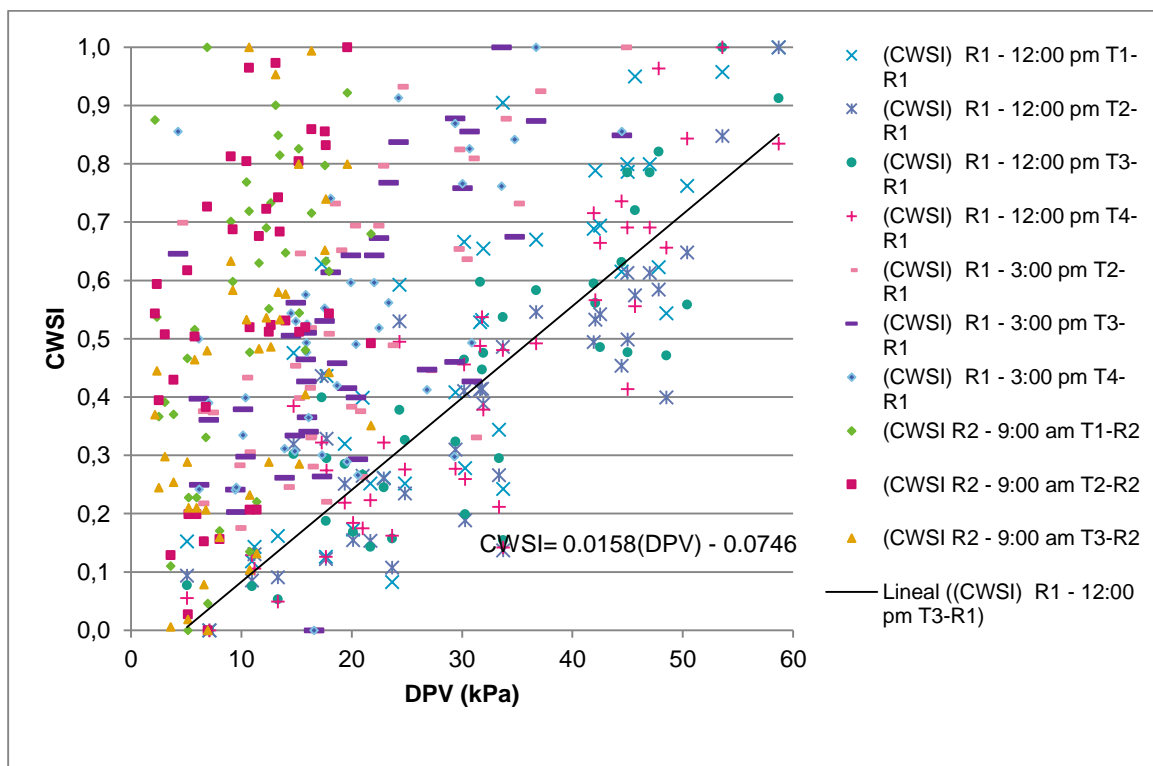
\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Recordando la relación que se realizó anteriormente de la temperatura del dosel Td y de la temperatura del ambiental Ta se asemeja a esta relación existente de igual forma entre CWSI y Ta , con la diferencia que la correlación entre estos dos últimos factores es mayor que la anterior en todas las horas medidas. Esto se explica gracias al ajuste que se realiza para hallar CWSI teniendo en cuenta la temperatura de las hojas cuando están secas y cuando están totalmente húmedas, acercándose más al estado real de la planta.

De la tal manera, la poca linealidad que se presenta entre Ta y CWSI en horas de la mañana y de la tarde, está dada por la necesidad de las plantas a cubrir la demanda hídrica en horas del mediodía y disminuirla a estas horas donde su temperatura es mayor a la temperatura ambiente Ta por falta de transpiración. Cuando una planta de hierbabuena (*Mentha spicata*) transpira a pleno, con los estomas totalmente abiertos y sin déficit hídrico, su temperatura puede ser hasta 3° C inferior a la temperatura del aire y su CWSI es más cercano a 0. Cuando falta agua y va disminuyendo la transpiración por el cierre de los estomas, la temperatura de la planta puede alcanzar hasta 5° C por encima de la temperatura del aire y, cuando la planta ya casi no transpira, el CWSI es muy cercano a 1. Esta variación drástica entre cero 0 y uno 1 de CWSI en comparación a la temperatura ambiental Ta, que varía paulatinamente durante todo el día explica los índices de correlación más bajos a ciertas horas del día.

Del mismo modo, como se puede encontrar en el marco teórico inicial del presente trabajo, existen diferentes métodos de obtención de del índice de estrés hídrico del cultivo CWSI donde en este caso se realizó el cálculo del mismo partir de las temperaturas del dosel medio y las referencias humedad y secas del mismo. Sin embargo, existe el CWSI determinado por la relación entre el diferencial térmico cultivo-ambiente y el déficit de presión de vapor DPV, el cual tiene en cuenta las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo. Por esta razón, en la figura 3-25 se relacionó el CWSI con DPV, el cual muestra una dispersión lineal en algunos tratamientos donde a medida que aumenta DPV aumenta proporcionalmente CWSI.



**Figura 3-25: Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI Vs. Déficit de presión de vapor DPV para ambas repeticiones.**

Realizando un análisis de la posible linealidad de la relación entre CWSI y DPV se encontraron altos índice de correlación de Pearson en especial en los tratamientos de R1 a las 12 del medio día donde para el tratamiento T3,  $r=0.881$  significativa al nivel de 0.01 bilateral (Tabla 3-8). Sin embargo, el alto nivel de correlación disminuye en la tarde y mucho más en la mañana, horas en las que las temperaturas  $T_a$  son mucho menores y la

humedad relativa HR es mayor que al medio día. Razón por la cual una planta estresada por falta de agua aprovecha en ocasiones para disminuir su tasa de transpiración

**Tabla 3-8: Índices de correlación lineal de Pearson entre DPV y los la respuesta CWSI de los tratamientos de riego.**

Tratamientos tomados a la hora correspondiente		CWSI T1	CWSI T2	CWSI T3	CWSI T4
DPV-R1-12pm	Correlación de Pearson	0.806**	0.855**	0.881**	0.875**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000
DPV -R1-3pm	Correlación de Pearson	0.629**	0.675**	0.575**	0.629**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000
DPV-R2-9am	Correlación de Pearson	0.471**	0.497**	0.529**	0.471**
	Sig. (bilateral)	0.002	0.001	0.000	0.002

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Estos resultados obtenidos concuerdan con A.W. Al-Kayssi *et al.*, (2011), quienes para el comino negro, encontraron las correlaciones más bajas para la CWSI y DPV, en horas de la mañana en dos campañas agrícolas consecutivas. Esta es la hora donde los estomas se inician abrir cuando el sol comienza a levantarse en la mañana. Sin embargo es al medio día donde los estomas alcanzan un grado crítico de la apertura, la evapotranspiración potencial no prevalece, el intercambio de calor radiante y conectivo domina en el balance energético de la copa. Luego la temperatura del dosel Td del comino negro aumenta gradualmente en relación con la temperatura del aire Ta con la subida de sol, hasta que se haya alcanzado el grado crítico de apertura. Entonces la relación lineal desarrollado entre CWSI y DPV se mantuvo hasta la disminución de la iluminación de la radiación solar en la tarde, cuando los iniciados de cierre de los estomas. Esta relación lineal de CWSI y VPD es la característica del estado evapotranspiración potencial.







## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

Las imágenes termográficas (IT) normalizadas por CWSI son una buena herramienta de detección del estado hídrico de la planta, ya que tiene en cuenta la relación Agua-planta-ambiente. La temperatura de la hoja actúa como un buen indicador del estado hídrico de la planta, dado que es claro que cuando las plantas están sufriendo estrés hídrico aumentan su temperatura, cerrando sus estomas para evitar el proceso normal de transpiración. Comparando este método con los métodos tradicionales las medidas obtenidas del potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) depende de las características del suelo y toma tiempo en detectar una disminución de la lámina de riego. La conductancia estomática ( $g_s$ ) por su parte se ve altamente influenciada por las condiciones ambientales de desarrollo de las plantas en cada hora del día, presentado una variación poco confiable para establecer las necesidades de riego de un cultivo.

Para las condiciones del estudio, una acentuación en el porcentaje de difusión de la luz en las propiedades del plástico de invernadero influye en un aumento en la temperatura ambiental ( $T_a$ ) y disminución de la humedad relativa (HR) en comparación a un plástico de difusión normal en horas de la mañana y de la tarde. En el invernadero con menor difusión de la luz se presenta un fenómeno conocido como “el efecto sombra” que implica tener zonas de pérdida de calor durante horas de la mañana y la tarde, donde el sol no se encuentra exactamente sobre los invernaderos. Luego, al medio día la sombra es minimizada en ambos invernaderos y presenta un comportamiento similar de las variables climáticas. Razón por la cual, las propiedades de los plásticos de invernadero pueden influir claramente en el comportamiento y desarrollo del cultivo, interviniendo en el microclima formado dentro de las unidades experimentales y las necesidades hídricas de las plantas.

La disminución de la lámina de riego calculada para el cultivo de Hierbabuena (*Mentha spicata*) en un 25% para las condiciones de la Sabana de Bogotá, puede influir en un mayor rendimiento del cultivo frente a la altura de la planta, el área foliar, y la materia fresca y seca, disminuyendo costos en términos de agua utilizada y aumento de la producción expresada en las características del cultivo. Sin embargo, en un invernadero con un plástico con mayor porcentaje de difusión de la luz esta disminución de riego no garantiza un aumento de este rendimiento aunque se presenten periodos de mayor luz, puesto que esto implican que la planta necesita mayor cantidad de agua, dado que su metabolismo está mayor tiempo activado. Luego, la lámina de riego calculada como óptima para el cultivo depende claramente de las condiciones climáticas de producción y no se debe generalizar.

Comparando los métodos de medición de estrés hídrico del cultivo se destaca la importancia del monitoreo de la conductancia estomática ( $g_s$ ) que demuestra su fuerza y rendimiento en condiciones de cielo despejado estables. Pero en el caso del potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) no muestra la diferencia de porcentaje de riego recibido en todos los tratamientos desde el inicio. Ya que al detener el riego generalizado inicial e iniciar los tratamientos estos estuvieron la mayoría del tiempo dentro de los rangos de óptimos de necesidades hídricas de un cultivo según el Watermark, mientras que los demás métodos ( $g_s$  y IT) evidenciaron un estrés hídrico en el cultivo. Razón por la cual no se encontró gran correlación entre el método de las imágenes termográficas (IT) y potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) y dada la sensibilidad del método de conductancia estomática ( $g_s$ ) tampoco se consideró como buena la correlación de este método con el de las imágenes termográficas (IT).

Relacionando las condiciones ambientales de temperatura ambiental ( $T_a$ ) y humedad Relativa (HR) con la conductancia estomática ( $g_s$ ), el análisis mostró una alta sensibilidad de ( $g_s$ ) a pequeños cambios en ( $T_a$ ) y por ende de la (HR). Cambios que se evidencian en ambos invernaderos y que expresan la fuerte relación entre la temperatura ambiental y la temperatura del dosel ( $T_d$ ) obtenida a través del método de las imágenes termográficas (IT) como lo evidenciaron las altas correlaciones obtenidas entre estas dos variables. En

caso del método de potencial matricial del suelo ( $\Psi_{ms}$ ) no se encontró ninguna relación con las variaciones climáticas ( $T_a$ ) y (HR) lo que confirma que este método no tiene en cuenta la relación planta-ambiente que consideran otros métodos que permiten estimar las necesidades reales de las plantas según las variaciones del clima.

## 4.2. Recomendaciones

Para mejorar la normalización de la temperatura del dosel ( $T_d$ ) por medio de índice de estrés hídrico se aconseja comparar el método de Jones *et al.*, 2002 y Idso *et al.*, 1981, donde el segundo, a diferencia del primero, tiene en cuenta el gradiente de la temperatura ambiental ( $T_a$ ) y su influencia y variación sobre la temperatura del dosel. La elección de los parámetros de aplicación de CWSI es un asunto que debe continuar el debate. Puesto que los modelos muestran una alta sensibilidad a la alteración de los parámetros clave que implican diferencias según el lugar de identificación del hídrico de la planta. Donde, la sensibilidad es más alta para el CWSI se presenta bajo condiciones secas. Sin embargo, es un método prometedor en el que se deben tener en cuenta estos ajustes climáticos para obtener los mejores resultados del mismo.

Frente al déficit de agua, las plantas han desarrollado varias estrategias de adaptación para hacer frente a la sequía. Una de ellas es el uso del agua de manera conservadora en momentos donde el entorno ambiental no le exige mayor demanda de agua. Limitando el consumo de agua, cuando el déficit de presión de vapor atmosférico (DPV) es alto e implica una gran demanda en las plantas para transpirar agua. Rasgo se expresa como el cierre parcial de las estomas bajo alto DPV, lo que puede ocurrir con frecuencia alrededor del mediodía, y se traduce en dos beneficios. En primer lugar, disminuye el DPV medio diario eficaz para la transpiración que permite el uso más eficiente del agua disponible. En segundo lugar, el agua se conserva para su uso posterior. Razón por la cual se recomienda en el análisis de estrés hídrico de las plantas no descartar la influencia de las variables climáticas para obtener un acercamiento más real a la condiciones y necesidades de los cultivos.

Dada la gran variabilidad de las temperaturas dentro del dosel dada por características de la hoja como el ángulo de inclinación y variables ambientales como la radiación y la velocidad del viento, se recomienda tener en cuenta estos parámetros de medición para futuros proyectos relacionados con la obtención de la temperatura de las hojas. Destacando la influencia de los mismos en la apertura y cierre estomático.

Este estudio surgió de la necesidad de desarrollar métodos fiables para estimar la transpiración de flujo de un cultivo de Hierbabuena (*Mentha spicata*) en condiciones de invernadero y, en general, analizar la influencia del flujo de temperatura en el ambiente interior. El análisis del microclima y el flujo de la transpiración, implica la comprensión de la existencia de una fuerte y estable estratificación térmica vertical durante el día (bajas o altas temperatura ambientales por debajo por encima de la temperatura del dosel), la estratificación de la humedad del aire (contenido de vapor de agua dentro el invernadero), teniendo en cuenta que estos dos fenómenos dan lugar a un fuerte efecto en la cubierta vegetal del cultivo.





# **A. Anexo: Comportamiento climático de los invernaderos en estudio. Validación de diferencias en condiciones climáticas**

## **Temperatura ambiente (Ta) y humedad relativa (HR)**

A continuación, se realizó un análisis del comportamiento de los datos reportados por los datalogers Extech Instruments ® referencia RT40 para la temperatura ambiente (Ta) y la humedad relativa (HR) de los dos invernaderos manejados en el proyecto: R1 (SPEKTRA-3®) y R2 (SPEKTRA-3-DIF ®). Ubicados en el centro (1.5 m sobre el suelo) y a la altura de las plantas del cultivo en cada invernadero. Programados la temperatura ambiente (Ta) y la humedad relativa (HR) teniendo en cuenta el comportamiento microclimático de los invernaderos. En este anexo se hace un especial énfasis al análisis del comportamiento de las horas del día en que midieron las variables de detección de estrés hídrico: 9 de la mañana, 12 del mediodía y 3 de la tarde.

- **Medidas el centro del invernadero (C) y a la altura de la planta (Ap).**

A continuación, se presentan la variación de la temperatura ambiente (Ta) y la humedad relativa (HR) en el interior de la estructura del invernadero uno R1 y del invernadero dos R2 respectivamente. Comparando las dos variables en los dos puntos de mediciones en el centro: TaC y HRC y la altura de la planta: TaAp y HRap, a las siguientes horas del día: 9 am, 12 pm y 3 pm. En ellas se buscó mostrar las diferencias en el comportamiento de la temperatura ambiente (Ta) y la humedad relativa (HR) entre las dos ubicaciones de los datalogers Extech Instruments ®. Como se puede observar en las gráficas correspondientes la variación de las temperaturas del aire (Ta) y humedad relativa (HR) interior concuerda con varios autores que han realizado este seguimiento para modelar el comportamientos de estas variables como Leal, (2006), donde a medida que aumenta la temperatura (Ta) disminuye en igual proporción la humedad relativa (HR).

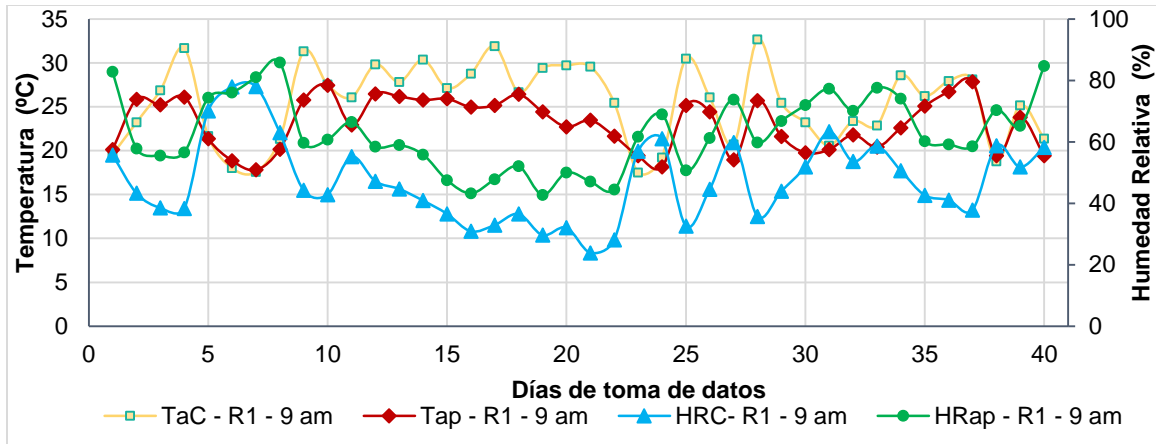
- ***Invernadero uno (respuesta de cultivo 1 R1)***

Las figuras 1, 2, 3 muestran una clara diferencia en las variaciones de las temperaturas ( $T_a$ ) y humedades relativas (HR) registradas en el centro(C) y a la altura de la planta (ap) en invernadero R1 en las tres horas del día en especial en horas de la mañana y de la tarde con una similitud entre las dos ubicaciones en la tendencia del comportamiento al medio día. Se encontró que a las 9 de la mañana la mayor temperatura y menor humedad relativa la registró el datalogger ubicado a la altura de la planta, mientras que al medio día y a las 3 de la tarde fue mayor la temperatura registrada en esta misma ubicación que lo concuerda con Sumathy (1999).

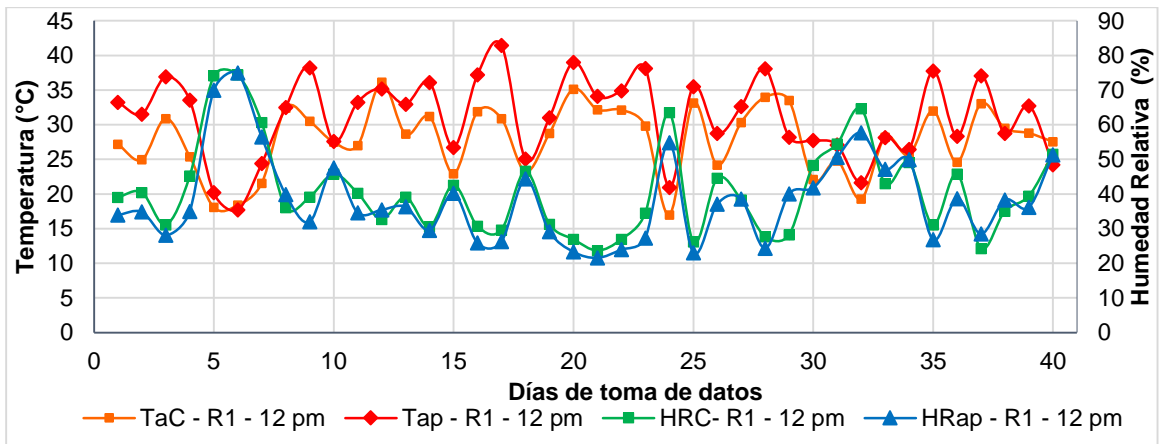
Para el invernadero R1 se presentó la máxima temperatura registrada a medio día en el centro del invernadero  $T_{aC}=36.15^\circ\text{C}$  el día 15 y a la altura de la planta de  $T_{aAp}=41.45^\circ\text{C}$  el día 17. Siendo inversamente proporcionales las humedades relativas más altas, se presentaron a las tres de la tarde en el centro del invernadero  $HRC=79.10\%$  el día 36 y a la altura de la planta  $HR_{ap}=85.75\%$  el día 5. Las menores temperaturas se evidenciaron en horas de la tarde el día 36 en el centro del invernadero  $T_{aC}=16.8^\circ\text{C}$  y a la altura de la planta de  $T_{aAp}=16.45^\circ\text{C}$ . Las menores humedades se evidenciaron al medio día el día 21 en el centro  $HRC=23.65\%$  y a la altura de la planta  $HR_{ap}=21.6\%$ . Así, la hierbabuena (*Mentha spicata*) estuvo expuesta a temperaturas y humedades relativas sugeridas como mínimas y máximas fisiológicas de desarrollo del cultivo que autores como Tesi (2001) definen como las temperaturas y humedades relativas óptimas de diversos cultivos.

Realizando un análisis estadístico de normalidad de los datos de temperatura en el centro del invernadero  $T_{ac}$  por medio de la prueba Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , ya que se cuenta con una muestra de 40 datos por medida, se encontró que todas las medidas siguen el modelo de distribución normal y lo que permite realizar pruebas de métodos estadísticos paramétricos con estas medidas. Sin embargo, en el caso de la humedad relativa medida en el centro del invernadero HRC en la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , se encontró que los datos de las 12 del medio no tienen un comportamiento similar a la de la distribución normal lo que limita su probabilidad de ocurrencia, y la posibilidad de realizar otras pruebas estadísticas con este tipo de datos no normalizados (Anexo B).

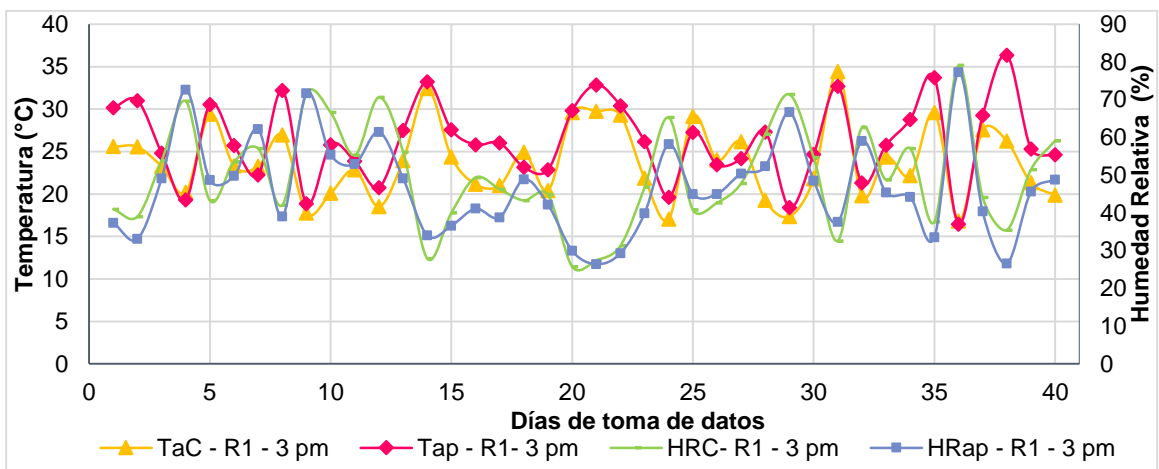




**Figura 1: Ta y HR registradas para la R1 a las 9 de la mañana.**



**Figura 2: Ta y HR registradas para la R1 a las 12 del medio día.**



**Figura 3: Ta y HR registradas para la R1 a las 3 de la tarde**

Del mismo modo, en el análisis estadístico para las mediciones de las 9 am, de temperatura ambiental (TaAp) medida a la altura de la plata no presentan un comportamiento de una distribución normal de probabilidades a diferencia de las otras mediciones que si cumplen esta característica. Y en la muestras de humedad relativa (HRAp) medida a la altura de la planta todas presentaron una comportamiento similar a una distribución normal excepto la de las 12 del mediodía al igual que en el centro,

▪ ***Invernadero 2 (respuesta del cultivo dos R2)***

De igual manera, que en R2 la figuras 4, 5, 6 muestran una marcada diferencia de las temperaturas (Ta) y humedades relativas (HR) registradas en el centro(C) y a la altura de la planta (Ap) en invernadero dos R2 en horas de la mañana y una similitud en la tendencia del comportamiento al medio día. Presentando una tendentica a la mayor la temperatura registrada a las 9 de la mañana en el centro del invernadero y al medio día y a las 3 de la tarde en la altura de la planta, lo que concuerda igualmente con Sumathy (1999).

Respecto a las temperaturas máximas y mínimas en el invernadero R2 se presentó la máxima temperatura registrada a medio día el día 17 en el centro del invernadero TaC=41.55°C y a la altura de la planta de TAp=52 °C. A su vez las humedades relativas más altas se presentaron a las 9 de la mañana en el centro HRC=79.4% el día 7 y a la altura de la planta HRAp=90.55%el día 8. Y las mínimas temperaturas en horas de la tarde el día 36 en el centro del invernadero TaC=16.35°C y a la altura de la planta de TAp=16.1 °C y de humedad relativa al medio día el día 21 en el centro HRC=21.6% y a la altura de la planta el día 38 HRAp=17.61% a las tres de la tarde. Lo que garantizo que el cultivo expuesto a condiciones climáticas adecuadas para el rendimiento máximo y calidad que requieren que las variables climáticas se mantengan dentro de umbrales óptimos para el cultivo (López *et al.*, 2000).

En el análisis estadístico de normalidad de los datos de temperatura Tac en el centro del invernadero R2 por medio de la prueba Shapiro-Wilk para  $n < 50$ , se encontró que la temperatura ambiente en el centro del invernadero a las 9 de la mañana es una variable aleatoria que no sigue el modelo normal de distribución de probabilidades, al igual que para los datos de humedad relativa HRC tomada en el centro del invernadero de las 12 del mediodía (Anexo B).

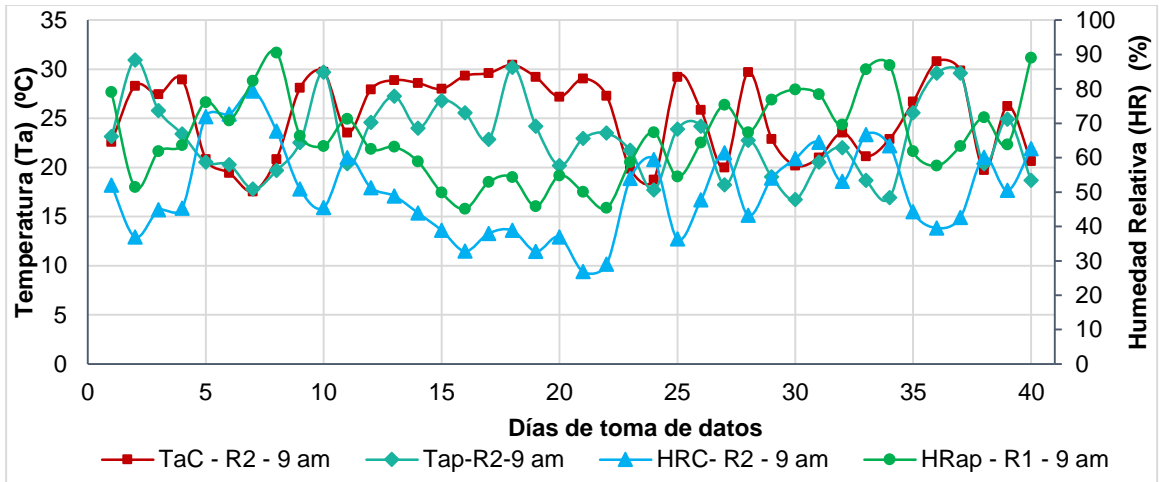


Figura 4: Ta y HR registradas para la R2 a las 9 de la mañana.

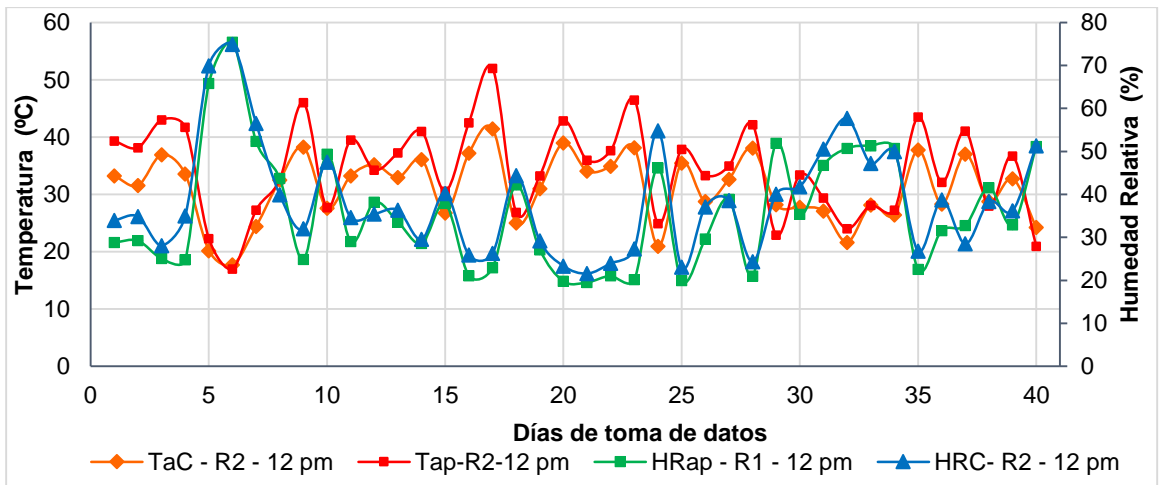


Figura 5: Ta y HR registradas para la R2 a las 12 del medio día.

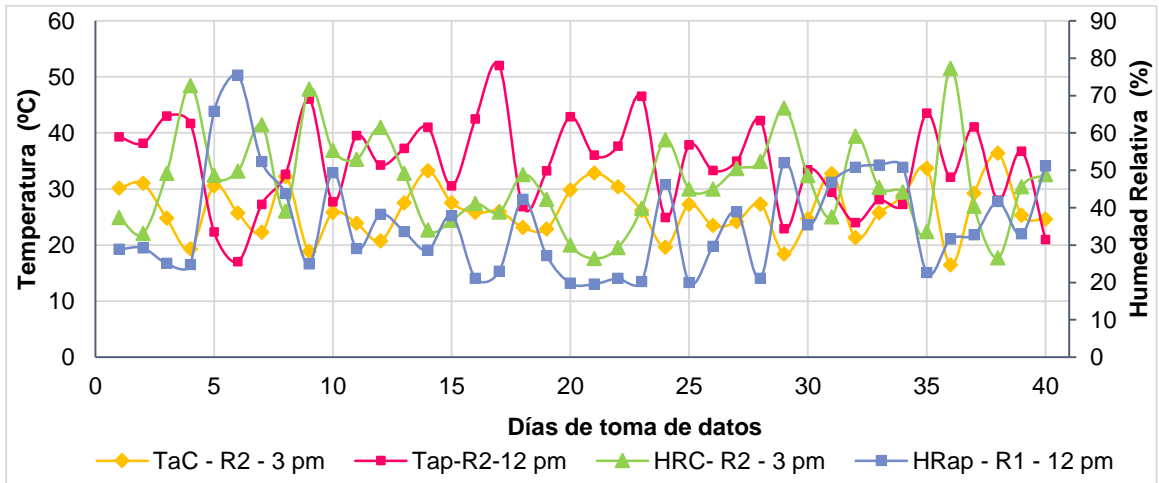


Figura 6: Ta y HR registradas para la R2 a las 3 de la tarde.

En el caso del análisis estadístico de los datos registrados a la altura de la planta para las mediciones de las 9 de la mañana de temperatura ambiental (Tap) no presentan un comportamiento de una distribución normal mientras que para la humedad relativa (HRap) medida a la altura de la planta todas presentaron un comportamiento similar a una distribución normal, por lo cual se tendrán en cuenta para realizar los siguientes análisis estadísticos.

- **Comportamiento de Ta y HR medidas a la altura de la planta (Ap) para las dos repeticiones.**

Como se ha nombrado anteriormente en este proyecto se trabajó con dos tipos de cubierta plástica de invernadero con iguales propiedades de resistencia mecánica, termicidad y transmisión de luz en la región PAR pero con diferentes porcentajes de difusión de la luz: invernadero R1 SPEKTRA-3® (35% de difusión de la luz) e invernadero R2 SPEKTRA-3DIF® (82% de difusión de la luz). Estas características y afirmaciones fueron dadas por el fabricante, sin embargo en este análisis se quiere corroborar dichas teorías gracias al seguimiento que se hizo del comportamiento de los plásticos en una instalación equipada con todas las condiciones adecuadas para el cultivo. Corroborando la hipótesis inicial de la existencia de dos ambientes controlados con microclimas diferentes que se dan solo con el cambio de una o algunas de las propiedades de los plásticos presentadas por varios autores anteriormente nombrados.

De tal forma, en las figuras 7, 8 y 9 se compararon entre sí los datos de temperatura (Ta) y humedad relativa (HR) obtenidos para los dos invernaderos medidas a la misma hora el mismo día, donde se puede observar en las gráficas iguales tendencias de comportamiento pero con pocas coincidencias en cada punto. Luego se realizó un análisis estadístico de comparación de medias T-Student para encontrar o no las diferencias significativas que existieron entre ellas para verificar la diferencia de comportamiento que se observa en las figuras.

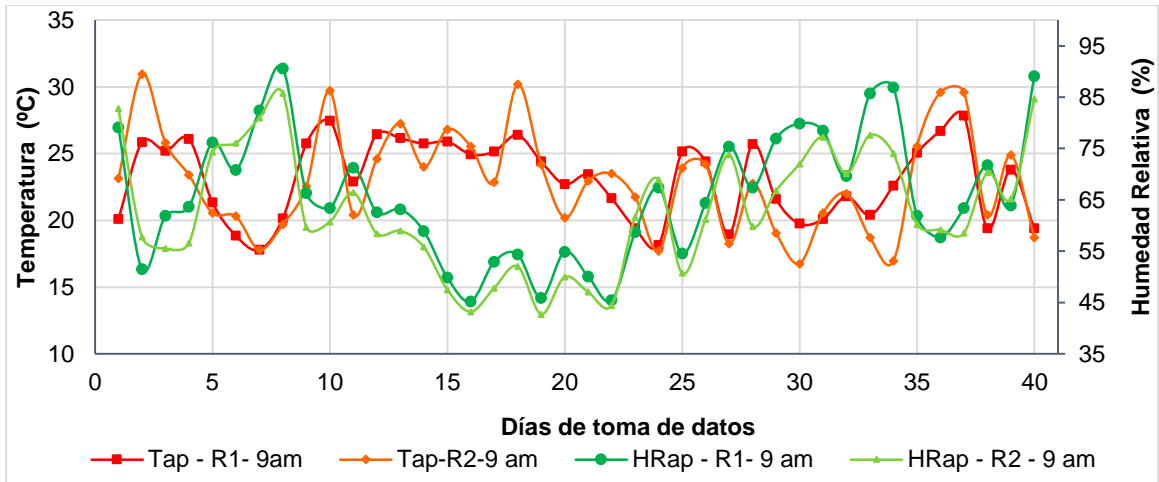


Figura 7: Comparación de Ta y HR en R1 y R2 registradas a las 9 de la mañana.

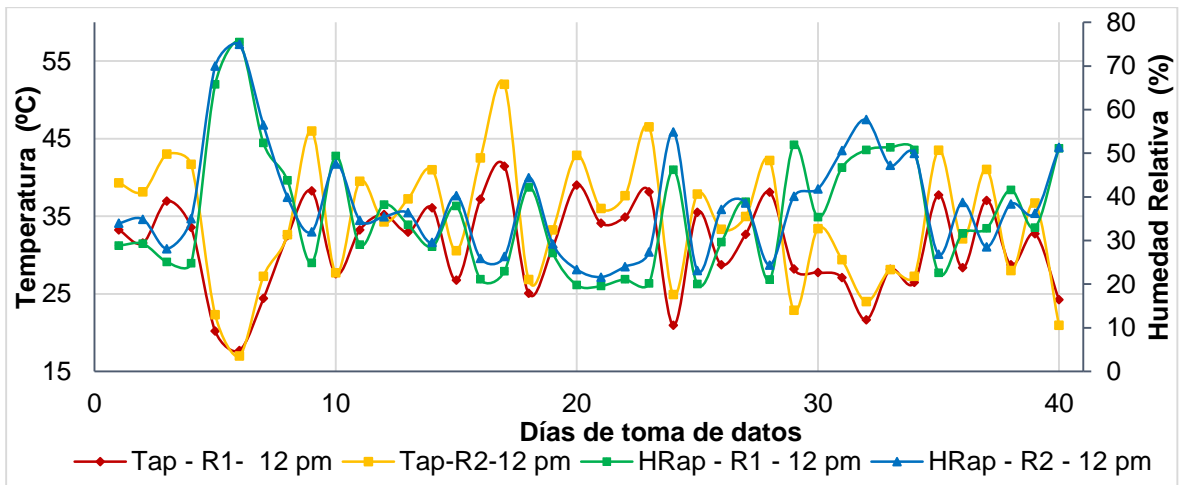


Figura 8: Comparación de Ta y HR p en R1 y R2 registradas a las 12 del medio día.

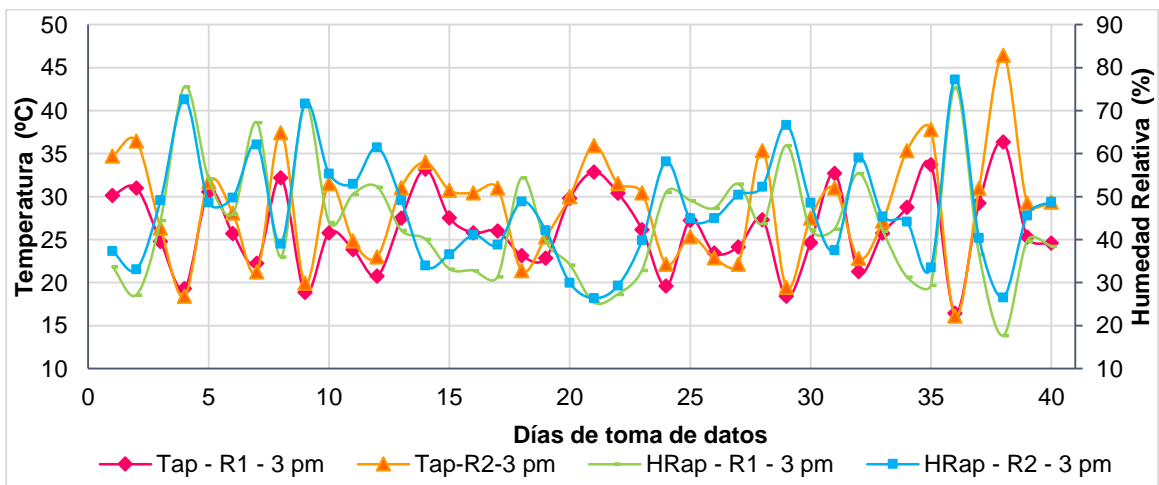


Figura 9: Comparación de Ta y HR para en R1 y R2 registradas a las 3 de la tarde.

Se realizó la prueba estadística de T-Student para pruebas relacionadas de temperatura Tap por un lado y la humedad relativa HRap por otro, a las 9 de la mañana (Figura 7). Descartando la comparación de medias de las temperaturas Tap-R1-9 am y Tap-R2-9 am dado que no presentan un comportamiento similar a la distribución normal. Y se presentó una diferencia significativa entre las humedades relativas HRap-R1-9 am y HRap-R2-9 am tomadas a la altura de la planta con un nivel de significación del 5 % (Anexo B).

Del mismo modo, para los datos tomados del medio día (Figura 8) Tap-R1-12 pm y Tap-R2-12 pm dado por una significación de contraste de 6,8%. Y para las humedades relativas HRap-R1-12 pm y HRap-R2-12 se descartó prueba estadística de T-Student dado que HRap-R1-12 pm no presenta un comportamiento similar a la distribución normal como lo indicó la prueba de normalidad realizada previamente. (Anexo B).

Y finalmente, realizando la comparación de medias por medio de la prueba de T-Student para los datos obtenidos a las tres de la tarde día (Figura 9) no se presentó una diferencia significativa entre las temperaturas Tap-R1-3 pm y Tap-R2-3 pm dado por una significación de contraste de 60,7%. Y para las humedades relativas HRap-R1-3 pm y HRap-R2-3 pm tomadas a la altura de la planta, la significación de contraste no es relevante por lo cual si existen diferencias significativas con un nivel de significación del 5% entre estas dos temperaturas de cada invernadero (Anexo B).

## B.Anexo: Ejemplos Salida estadística programa SPSS.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk Temperatura del dosel Td 9 de la mañana,

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T1_R1	0.103	40	0.200*	0.961	40	0.183
T2_R1	0.137	40	0.055	0.959	40	0.151
T3_R1	0.104	40	0.200*	0.963	40	0.211
T4_R1	0.113	40	0.200*	0.952	40	0.092
T1_R2	0.099	40	0.200*	0.961	40	0.176
T2_R2	0.149	40	0.025	0.937	40	0.028
T3_R2	0.100	40	0.200*	0.977	40	0.596
T4_R2	0.089	40	0.200*	0.975	40	0.510

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk conductancia estomática 3 de la tarde.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T1_R2	0.111	40	0.200*	0.960	40	0.165
T2_R2	0.093	40	0.200*	0.963	40	0.217
T3_R2	0.110	40	0.200*	0.962	40	0.203
T4_R2	0.112	40	0.200*	0.964	40	0.227

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

**Prueba de medias de T- T-Student para pruebas relacionadas para potencial matricial a las 12 del mediodía.**

Prueba de muestras relacionadas

	Diferencias relacionadas	Sig. (bilateral)
--	--------------------------	------------------

	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia		
				Inferior	Superior	
Par 1 T2_R1 - T2_R2	8.32500	5.69024	0.89971	6.50517	10.14483	0.000

**Prueba de correlación lineal de Pearson temperatura ambiente y temperatura del dosel.**

		Correlaciones				
		Ta_R1_12pm	T1	T2	T3	T4
Ta_R1_12pm	Correlación de Pearson	1	0.808**	0.816**	0.844**	0.826**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	40	40	40	40	40
T1	Correlación de Pearson	0.808**	1	0.942**	0.910**	0.844**
	Sig. (bilateral)	.000		0.000	0.000	0.000
	N	40	40	40	40	40
T2	Correlación de Pearson	0.816**	0.942**	1	0.945**	0.909**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	40	40	40	40	40
T3	Correlación de Pearson	0.844**	0.910**	0.945**	1	0.931**
	Sig. (bilateral)	.000	0.000	0.000		0.000
	N	40	40	40	40	40
T4	Correlación de Pearson	0.826**	0.844**	0.909**	0.931**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	40	40	40	40	40

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).



## Bibliografía

1. Al-Kayssi A.W., R.M. Shihab, S.H. Mustafa.2011.Impact of soil water stress on Nigellone oil content of black cumin seeds grown in calcareous-gypsifereous soils, Agricultural Water Management, Volume 100, Issue 1, 15 November, Pages 46-57, ISSN 0378-3774.
2. Alonso, Jorge. 2004. Tratado de fitofármacos y nutracéuticos. Ed. CORPUS. Rosario, Santa Fe
- 3.Álvarez-Herrera, J. G., Chacón, E., Rodríguez, S. L. 2008.Efecto de dos sustratos y diferentes láminas de riego en la propagación de romero (*Rosmarinus officinalis* L.). Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica, Vol. 11, No. 1, Jun., pp. 103-111.
- 4.Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization. Roma
- 5.Arizo.O, A. Curioni y G. Motta 2008 Evolución de las importaciones y exportaciones argentinas de mentol y aceites esenciales de menta. Análisis de la balanza comercial de la década 1996- 2005. Horticultura Argentina 27(63).
- 6.Balaguera, H. E.; Alvarez-Herrera, J. G. and Rodríguez, Jorge Daniel.2008. Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.).Agron. colomb. [online], vol.26, n.2, pp. 246-255. ISSN 0120-9965.
- 7.Barbosa da Silva B., T.V. Ramana Rao. 2005. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil, Journal of Arid Environments, Volume 62, Issue 4, September, Pages 649-659, ISSN 0140-1963
- 8.Barbour S. 1998. The soil-water characteristic curve: a historical perspective. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- 9.Barrios Gómez, Edwin J.; López Castañeda, Cándido; Kohashi Shibata, Josué; Acosta Gallegos, Jorge A.; Miranda Colín, Salvador; Mayek Pérez, Netzahualcóyotl. 2011. Avances En El Mejoramiento Genético Del Frijol En México Por Tolerancia A Temperatura

Alta Y A Sequía. Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 34, núm. 4, octubre-diciembre, pp. 247-255 Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Chapingo, México

10. Barrios-Gómez E. J, López-Castañeda C., Kohashi-Shibata J. 2011. Relaciones Hídricas Y Temperaturas Altas En Frijol Del Tipo “Flor De Mayo”. Agronomía Costarricense 35(1): 131-145. ISSN:0377-9424 /

11. Bellvert J., P.J. Zarco-Tejada, J. Girona, E. Fereres. 2013. Mapping crop water stress index in a ‘pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precis. Agric.* (2013), pp. 1-16

12. Belin É., D. Rousseau, J. Rojas-Varela, D. Demilly, M.-H. Wagner, M.-H. Cathala, C. Dürr. 2001. Thermography as non invasive functional imaging for monitoring seedling growth, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 79, Issue 2, November, Pages 236-240, ISSN 0168-1699

13. Best, S.; G. Gatica y L. León. 2009. Desarrollo de UN modelo de evaluación del estrés hídrico de un viñedo basado en el uso de termografía infrarroja.

14. Brady, N.C. y R.R. Weil. 2002. *The nature and properties of soils*. 13th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.

15. Brodribb T.J., G.J. Jordan. 2008. Internal coordination between hydraulics and stomatal control in leaves. *Plant Cell Environ.*, 31, pp. 1557–1564

16. Buchanan B, Gruissem W, Jones RL. 2000. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. ASPP. Rockville, Maryland, USA

17. Bunce. J.A. 1998. Effects of humidity on short-term response of stomatal conductance to an increase in carbon dioxide concentration. *Plant Cell Environ.*, 21, pp. 115–120

18. Campbell, G.S. J.M. Norman. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics* Springer-Verlag, New York, NY, USA.

19. Cardenas-Lailhacar B., M.D. Dukes. 2010. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions, *Agricultural Water Management*, Volume 97, Issue 5, May, Pages 666-672, ISSN 0378-3774.

20. Castro-Loarca O. R.; Veliz E. y Esquit V., .2009. Programación del riego según la relación: agua-suelo-caña de azúcar-clima. Una herramienta técnica para planificar el riego y responder a las interrogantes: ¿Cuánto y cuándo regar?. CENGICAÑA;

Corporación Pantaleón-Concepción. Km 92.5 carretera a Santa Lucia Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.

21. Cerny ATN, Rajapakse C, Ryu YO. 1999. Recent development in photosensitive greenhouse covers. Proc. Nat. Agric. Plastics Congress. American Society for Plasticulture. Tallahassee, Florida. USA. pp: 24-26.

22. Cohen, Y., V. Alchanatis, M. Meron, Y. Saranga, J. Tsipris. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, pp. 1843–1852.

23. Cuervo, J.L. 2012. Manual de los cultivos de albahaca, menta y estevia. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

24. Cuevas J., V. Pinillos, M.L. Cañete, S. Parra, M. González, F. Alonso, M.D. Fernández, J.J. Hueso. 2012. Optimal duration of irrigation withholding to promote early bloom and harvest in 'Algerie' loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.), *Agricultural Water Management*, Volume 111, August, Pages 79-86, ISSN 0378-3774.

25. Curioni, A y O. Arizio. 2006 Plantas aromáticas y medicinales. Ed. Hemisferio Sur Bs As.

26. Daryl R. Chastain, John L. Snider, Guy D. Collins, Calvin D. Perry, Jared Whitaker, Seth A. Byrd. 2014. Water deficit in field-grown *Gossypium hirsutum* primarily limits net photosynthesis by decreasing stomatal conductance, increasing photorespiration, and increasing the ratio of dark respiration to gross photosynthesis, *Journal of Plant Physiology*, Volume 171, Issue 17, 1 November, Pages 1576-1585, ISSN 0176-1617,

27. Davis, C. Ehsani, R. Mishra, A. Sankaran, S. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. En: *ScienceDirect Computers and Electronics in Agriculture* 72 1–13, 46-53, ISSN en Línea 1669-2314 - ISSN Edición Impresa 0325-8718.

28. Demrati H., T. Boulard, H. Fatnassi, A. Bekkaoui, H. Majdoubi, H. Elattir, L. Bouirden, Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop, *Biosystems Engineering*, Volume 98, Issue 1, September 2007, Pages 66-78, ISSN 1537-5110, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.016>.

29. Díaz J.A. 2003. Informe técnico. Caracterización del mercado colombiano de plantas medicinales y aromáticas. Instituto Alexander von Humboldt – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá.

- 
30. Dick, R.P. 2004. Soil Biological, chemical and physical dynamics during transition to nonthermal residue management grass seed systems. Online Internet. Oregon. GSCSSA. Progress report FY00. Disponible en: <http://gscssa.wsu.edu/progress/00/100.html>. (Consultado en noviembre de 2014)
31. Durner W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 32(9):211-223.
32. Durigon Angelica, Quirijn de Jong van Lier. 2013. Dose temperature versus soil water pressure head for the prediction of crop water stress, *Agricultural Water Management*, Volume 127, September, Pages 1-6, ISSN 0378-3774.
33. E.-Jaimez, R ; Da-Silva, R. ; D' Aubeterre, A. ; Allende, J.; Rada, F.; Figueiral, R. 2005. Variaciones microclimáticas en invernadero: efecto sobre las relaciones hídricas e intercambio de gases en pimentón (*capsicum annum*). *Agrociencia*, vol. 39, núm. 1, enero-febrero , pp. 41-50 Colegio de Postgraduados Texcoco, México.
34. Erdem, Y.; Erdem, A. T.; Orta H.; Okursoy H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (IEHC). *Journal of Central European Agriculture*. Volume 6. No. 4: 449-460.
35. Esmeral, Y. R. 2011. Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de la Rosa. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. 94p. Tesis Maestría
36. FAO. Las hierbas aromáticas producidas en Colombia consolidan su fortaleza exportadora. Fecha de publicación: 18/04/2012 País: Colombia. [http://www.fao.org/agronoticias/agronoticias/detalle/en/?dyna\\_fef%5Buid%5D=135175](http://www.fao.org/agronoticias/agronoticias/detalle/en/?dyna_fef%5Buid%5D=135175).
37. Fernández Escobar, R., Trapero, A., Domínguez, J. 2010. Experimentación en Agricultura. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, 350 pp
38. Fletcher A.L., T.R. Sinclair, L.H. Allen. 2007. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean. *Environ. Exp. Bot.*, 61, pp. 145–151
39. Fuentes, J.L. y G. García. 1999. Técnicas de riego. Ed. Mundi-Prensa, México, D.F
40. Ganjian. N, Pashang Y., and Majdeddin S. 2003. Of Soil–Water, Characteristic Curve Based on Soil Index Properties. University of Tehran, Iran.

41. García-Enciso, Ema Laura *et al.* 2014. Efecto de una película plástica modificada en algunos aspectos bioquímicos de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Ecosistemas y recur. agropecuarios* [online], vol.1, n.2, pp. 151-162. ISSN 2007-901X.
42. García, F.J.; Rosello, J. Y Santamaría, M.P. 2006. *Iniciación a la Fisiología de las Plantas*. Editorial Foro Europa. Universidad Politécnica de Valencia, \- 182 pages. ISBN: 8497059441, 9788497059442.
43. García Lozano J, 2014. *Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico* Jairo I.A. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. 94p. Tesis Maestría
44. Giraldo H., y Gómez J. 2012. Las hierbas aromáticas consolidan su fortaleza exportadora en Estados Unidos y Europa. *Diario la república*. Edición Miércoles-Abril 18.
45. Gontia N.K., K.N. Tiwari.2008. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry, *Agricultural Water Management*, Volume 95, Issue 10, October, Pages 1144-1152, ISSN 0378-3774.
46. Gómez-Bellot María J., Pedro A. Nortés, María J. Sánchez-Blanco, María F. Ortuño. 2015. Sensitivity of thermal imaging and infrared thermometry to detect water status changes in *Euonymus japonica* plants irrigated with saline reclaimed water, *Biosystems Engineering*, Volume 133, May 2015, Pages 21-32, ISSN 1537-5110.
47. González-Dugo V., P. Zarco-Tejada, J.A.J. Berni, L. Suárez, D. Goldhamer, E. Fereres.2012. Almond tree dosel temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. *Agric. Forest Meteorol.*, 154 (15) , pp. 156-16
48. Grams, T.E., C. Koziolk, S. Lautner, R. Matyssek, J. Fromm. 2007. Distinct roles of electric and hydraulic signals on the reaction of leaf gas exchange upon re-irrigation in *Zea mays* L. *Plant Cell Environ*,30, pp. 79–84
49. Grant M.O., L. Tronina, H.G. Jones, M. Chaves. 2007. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *J. Exp. Bot.*, 58 (4), pp. 815–825
50. Gurovich, L.A. 2009. El agua en el suelo, pp. 61-72. En: Gurovich, L.A. (ed.). *Riego superficial tecnificado*. 2a ed. Editorial Universidad Católica de Chile, Santiago
51. Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Dram. Eng.* 120(6), 1132-1139.

- 
52. Hernández Cortés José A. 2013. Regulación Del Cierre Estomático: una Función Representada por Varios Actores. Grupo de Biotecnología de Frutales, CEBAS. Consejo superior de investigaciones científicas. Campus Universitario de Espinardo. Espinardo. Murcia. España
53. Hetherington, A.M., F.I. Woodward. 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424, pp. 901–908.
54. Huntingford Chris, D. Mark Smith, William J. Davies, Richard Falk, Stephen Sitch, Lina M. Mercado. 2015. Combining the [ABA] and net photosynthesis-based model equations of stomatal conductance, *Ecological Modelling*, Volume 300, 24 March, Pages 81-88, ISSN 0304-3800.
55. Idso S.B., R.D. Jackson, P.J. Pinter, R.J. Reginato, J.L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability, *Agricultural Meteorology*, 24, pp. 45–55
56. Itenfisu, D.; Elliott L.; Allen, R.G.; Walter, I.A. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(6), 440-448.
57. Johnson RS, Le Williams, Je Ayars & TJ Trout. 2005. Weighing lysimeters aid study of water relations in tree and vine crops. *California Agricultura* 59:133-136.
58. Jones. H.G. 1990. Plant water relations and implications for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278 , pp. 67–76
59. Jones. H.G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95 , pp. 139–149
60. Jones H.G. and Leinonen, I. 2003 .Thermal imaging for the study of plant water relations. *Journal of Agricultural Meteorology*, 59 (3)- pp. 205–217
61. Jones Hamlyn G. 2013. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press. Third Edition.
62. Kendall C. De Jonge, Saleh Taghvaeian, Thomas J. Trout, Louise H. Comas. 2015. Comparison of dosel temperature-based water stress indices for maize, *Agricultural Water Management*, Volume 156, 1 July, Pages 51-62, ISSN 0378-3774.

63. Kholova J., C.T. Hash, P.L. Kumar, R.S. Yadav, M. Kocova, V. Vadez. 2010. Terminal drought-tolerant pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] have high leaf ABA and limit transpiration at high vapour pressure deficit. *J. Exp. Bot.*, 61 (2010), pp. 1431–1440.
64. Kittas, C., N. Katsoulas, N. Rigakis, T. Bartzanas, E. Kitta. 2012. Effects on microclimate, crop production and quality of a tomato crop grown under shade nets. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 87 (1), pp. 7–12
65. LEAL, J. 2006. Efecto de la variación de la densidad del aire en la temperatura bajo condiciones de invernadero. *Ciencia UANL* 9 (3): 290–297.
66. Lopes, Otávio D. et al. 2011. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online], vol.15, n.6, pp. 548-553. ISSN 1807-1929. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000600002>.
67. López-Canteñs et al. 2010. Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 6 (1): 44-50,
68. Leuzinger Sebastian, Christian Körner. 2007. Tree species diversity affects dosel leaf temperatures in a mature temperate forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 146, Issues 1–2, 11 Septembe, Pages 29-37, ISSN 0168-1923.
69. Li L., D.C. Nielsen, Q. Yu, L. Ma, L.R. Ahuja. 2010. Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO<sub>2</sub> fluxes over winter wheat and maize in the North China plain, *Agricultural Water Management*, Volume 97, Issue 8, August, Pages 1146-1155, ISSN 0378-3774.
70. López- López R.; R. Arteaga-Ramírez; M. A. Vázquez-Peña; I. L. López-Cruz; I. Sánchez-Cohen; A. Ruiz-García. 2009. Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Tabasco, MÉXICO. Universidad Autónoma Chapingo. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15(3): 259-267.
71. Mahey, R.K, R. Singh, S.S. Sidhu, R.S. Narang. The use of remote-sensing to assess the effects of water-stress on wheat. *Exp. Agric.*, 27 (1991), pp. 423–429

72. Martínez-Bernal, L. 2009. Determinación del requerimiento hídrico de la albahaca (*Ocimum basilicum*) y comparación de dos sistemas de microirrigación (microaspersión y goteo) en condiciones de clima frío, bajo invernadero. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá
73. Mcainsh MR, NH Evans, LT Montgomery & KA North. 2002. Calcium signalling in stomatal responses to pollutants. *New Phytologist* 153: 441-447.
74. Mediavilla, J.L. A. Escudero. 2003. Stomatal responses to drought at a Mediterranean site: a comparative study of co-occurring woody species differing in longevity. *Tree Physiology*, 23, pp. 987–996
75. Metin Sezen S., Attila Yazar, Yıldız Daşgan, Seral Yucel, Asiye Akyıldız, Servet Tekin, Yelderem Akhoundnejad. 2014. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes, *Agricultural Water Management*, Volume 143, September, Pages 59-70, ISSN 0378-3774.
76. Möller M., V. Alchanatis, Y. Cohen, M. Meron, J. Tsipris, V. Ostrovsky. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *J. Exp. Bot.*, 58, pp. 827–838.
77. Monteiro, P.F.C., R. Angulo Filho, A.C. Xavier, R.O.C. Monteiro. 2012. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperSPEKTRAI measurements. *Scientia Agricola*, 69, pp. 87–94
78. Monteith J.L. 1995. A reinterpretation of stomatal conductance to humidity. *Plant. Plant Cell Environ.*, 18, pp. 357–364.
79. Montero J.L., Anton A., 2002. Comparative Performance of a High and Low Pressure Fog Systems Driven by Vapor Pressure Deficit Control. *Acta Horticulturae* (Submitted)
80. Moratiel R., A. Martinez-Cob. 2012, Evapotranspiration of grapevine trained to a gable trellis system under netting and black plastic mulching. *Irrig. Sci.*, 30, pp. 167-178.
81. Naor A. 2008. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, 32, pp. 111–165
82. Olivo N., J. Girona, J. Marsal. 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Science*, 27, pp. 175–182
83. Orellana López, Jessica Viviana. (2013). “Efecto De Varias Dosis De Fertilizante Nitrogenado En El Comportamiento Agronómico Del Cultivo De Hierbabuena (*Mentha*



Sativa L) En La Parroquia Cone Provincia Del Guayas”. Tesis previa a la obtención del Título De Ingeniero Agrónomo. Universidad De Guayaquil Facultad De Ciencias Agrarias. Milagro – Ecuador

**84.** O'Shaughnessy S., S.R. Evett , P.D. Colaizzi, T.A. Howell, 2011. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton, *Agricultural Water Management*, Volume 98, Issue 10, August 2011, Pages 1523-1535, ISSN 0378-3774, h

**85.** Padhi J., R.K. Misra, J.O. Payero.2012 Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography, *Field Crops Research*, Volume 126, 14 February, Pages 45-55, ISSN 0378-4290.

**86.** Palacios, E. 2002. ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? para lograr mejores cosechas. 2a. ed. Editorial Trillas, México D.F

**87.** Patel N.R, A.N Mehta, A.M Shekh. 2001. Dose temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 109, Issue 3, 3 September, Pages 223-232, ISSN 0168-1923,-X.

**88.** Patiño, M. y C. Urrea. 2003. Estudio de las necesidades de riego del cultivo de la menta bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

**89.** Pedraza, Rafael and HENAO, Martha C.2008.Composición del tejido vegetal y su relación con variables de crecimiento y niveles de nutrientes en el suelo en cultivos comerciales de menta (*Mentha spicata* L.). *Agron. colomb.* [online], vol.26, n.2, pp. 186-196. ISSN 0120-9965.

**90.** Pirkner Moran, Josef Tanny, Or Shapira, Meir Teitel, Shabtai Cohen, Yosepha Shahak, Yair Israeli. 2014. The effect of screen type on crop micro-climate, reference evapotranspiration and yield of a greenhouse banana plantation, *Scientia Horticulturae*, Volume 180, 17 December. Pages 32-39, ISSN 0304-4238.

**91.** Potters, G., T.P. Pasternak, Y. Guisez, K.J. Palme y M.A.K. Jansen.2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3), 99-105.

**92.** Pou Alícia, Maria P. Diago, Hipólito Medrano, Javier Baluja, Javier Tardaguila.2014. Validation of thermal indices for water status identification in grapevine, *Agricultural Water Management*, Volume 134, 1 March, Pages 60-72, ISSN 0378-3774.

- 
93. Puerto, M. Arco, 2000. Calefacción de Invernaderos en el Sureste Español. 1a. d. Caja Rural de Almería. Junta de Andalucía. Almería, España. pp: 11-13
94. Qingwu Xue, Albert Weiss, Timothy J. Arkebauer, P. Stephen Baenziger. 2004. Influence of soil water status and atmospheric vapor pressure deficit on leaf gas exchange in field-grown winter wheat, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 51, Issue 2, April, Pages 167-179, ISSN 0098-8472.
95. Quintero Arias, G. (2015). . Análisis comparativo de la respuesta de 3 variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo gourmet a la producción bajo ambientes protegidos en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería - Ingeniería Agrícola.
96. Rincón Guerrero Natalia; Olarte Quintero Manuel Andrés y Pérez Naranjo Juan Carlos. 2012. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín* . Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín. ISSN: 0304-2847 (impreso). ISSN: 2248-7026 (en línea
97. Sánchez-Díaz, M. y J. Aguirreolea . 2000. Capítulo 4: Transporte de agua y balance hídrico en la planta. pp. 53-57. En: Azcon-Bieto, J. y M. Talón (ed.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw Hill/ Interamericana de España, Barcelona.
98. Sánchez-Díaz M ., Aguirreolea J. 2001. Movimientos estomáticos y transpiración. *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (Azcón J., Talón M., Eds.). Universidad de Navarra, Capítulo 3. pags. 31-43
99. Satyendra Kumar, M. Imtiyaz, Ashwani Kumar, Rajbir Singh. 2007. Response of onion (*Allium cepa* L.) to different levels of irrigation water, *Agricultural Water Management*, Volume 89, Issues 1–2, 16 April, Pages 161-166, ISSN 0378-3774.
100. Schulze, E.D. 1986. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 37, pp. 247–274
101. Shao, H.B., Chu , C.A. Jaleel y C.X. Zhao. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.
102. Shwetha, P., Varija, K. 2015. Soil Water Retention Curve from Saturated Hydraulic Conductivity for Sandy Loam and Loamy Sand Textured Soils, *Aquatic Procedia*, Volume 4, Pages 1142-1149, ISSN 2214-241X

- 103.** Sinclair T.R., G.L. Hammer, E.J. van Oosterom. 2005. Potential yield and water-use efficiency benefits in sorghum from limited maximum transpiration rate. *Funct. Plant Biol.*, 32, pp. 945–952
- 104.** Sinclair T.R., C.D. Messina, A. Beatty, M. Samples. 2010. Assessment across the United States of the benefits of altered soybean drought traits. *Agron. J.*, 102, pp. 475–482
- 105.** Sumathy K., 1999. Effect of SPEKTRAI quality on horticultural plant propagation in a greenhouse, *Applied Energy*, Volume 64, Issues 1–4, 1 September, Pages 175-180, ISSN 0306-2619.
- 106.** Svein O. Grimstad, The effect of a daily low temperature pulse on growth and development of greenhouse cucumber and tomato plants during propagation, *Scientia Horticulturae*, Volume 53, Issues 1–2, January 1993, Pages 53-62, ISSN 0304-4238, [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90137-F](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4238(93)90137-F).
- 107.** Taghvaeian S., L.H. Comas, K.C. DeJonge, T.J. Trout. 2014. Conventional and simplified dosel temperature indices predict water stress in sunflower. *Agr. Water Manage.*, 144, pp. 69–80.
- 108.** Tanny Josef. 2013 Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review, *Biosystems Engineering*, Volume 114, Issue 1, January 2013, Pages 26-43, ISSN 1537-5110.
- 109.** Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. *Plant Physiology*. 4th ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA .García, F.J., Roselló J. y Santamarina P. 2006. *Introducción al funcionamiento de las plantas*. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN. 8497059441, 9788497059442, 182 Pág.
- 110.** Takahiro Sato, Osman S. Abdalla, Theib Y. Oweis, Tetsuo Sakuratani.2006. Effect of supplemental irrigation on leaf stomatal conductance of field-grown wheat in northern Syria, *Agricultural Water Management*, Volume 85, Issues 1–2, 16 September, Pages 105-112, ISSN 0378-3774.
- 111.** Tesi, R. 2001. *Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo*. Three ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- 112.** Thompson R.B., M. Gallardo, L.C. Valdez, M.D. Fernández.2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors, *Agricultural Water Management*, Volume 88, Issues 1–3, 16 March, Pages 147-158, ISSN 0378-3774.

113. Torrente, T.A. 2009. Potencial de agua en el suelo y su relación hídrica en los cultivos de passifloras, granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) y maracuyá (*Passiflora edulis*) en el Huila. Grupo de Investigación GHIDA, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.
114. Urrego-Pereira Yenny, José Cavero, Eva T. Medina, Antonio Martínez-Cob. 2013. Microclimatic and physiological changes under a center pivot system-irrigating maize, *Agricultural Water Management*, Volume 119, March, Pages 19-31, ISSN 0378-3774.
115. Valenzuela A. 1997. Estudio Comparativo de Eficiencia de Riego en California (Usa) y Valle Central de Chile Departamento de Riego y Drenaje .Facultad Ingeniería Agrícola .Universidad de Concepción. Tesis Maestría
116. Van Genuchten M., Simunet, J., Leij, F. and Sejna, M. 2000. RETC version 6. Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Laboratory, USDA, ARS, USA. 68 p.
117. Vico Giulia, Stefano Manzoni, Sari Palmroth, Martin Weih, Gabriel Katul. 2013. A perspective on optimal leaf stomatal conductance under CO<sub>2</sub> and light co-limitations, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 182–183, 15 December, Pages 191-199, ISSN 0168-1923
118. Villa, H.; Hugalde, I. Di Filippo M. 2011. Estimación del potencial hídrico en vid por medio de medidas termográficas y eSPEKTRALES. *Revista RIA - INTA –Vol. 37*.
119. Wang D., K. Yaohu y W. Shuqin. 2007. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. *Agr. Water Manage.* 8, 180-186. Xing-Wang, F., Y. Kang, S. Liu-Ping y X. Yan-Hou. 2007. Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain. *Agr. Water Manage.* 88, 34-42.
120. Wang, X. Yang, W. Wheaton, A. Cooley, N. Bill Moran, B. 2010. Automated dosel temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. En: *Science Direct Computers and Electronics in Agriculture* 73 74–83.
121. Xianmin Chang, Peter G. Alderson, Charles J. Wright. 2008. Solar irradiance level alters the growth of basil (*Ocimum basilicum* L.) and its content of volatile oils, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 63, Issues 1–3, May, Pages 216-223, ISSN 0098-8472.

- 
- 122.** Xue, Q, A. Weiss, T.J. Arkebauer, P.S. Baenziger. 2004. Influence of soil water status and atmospheric vapor pressure deficit on leaf gas exchange in field-grown winter wheat. *Environ. Exp. Bot.*, 51, pp. 167–17.
- 123.** Xuezhi Wang, Weiping Yang, Ashley Wheaton, Nicola Cooley, Bill Moran, Automated dosel temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 73, Issue 1, July 2010, Pages 74-83, ISSN 0168-1699.
- 124.** Yeşim Ahi, Halim Orta, Arzu Gündüz, Hüseyin T. Gültaş. 2015. The Dosel Temperature Response to Vapor Pressure Deficit of Grapevine cv. Semillon and Razaki, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Volume 4, Pages 399-407, ISSN 2210-7843.
- 125.** Zhu L.W., P. Zhao, Q. Wang, G.Y. Ni, J.F. Niu, X.H. Zhao, Z.Z. Zhang, P.Q. Zhao, J.G. Gao, Y.Q. Huang, D.X. Gu, Z.F. Zhang. 2015. Stomatal and hydraulic conductance and water use in a eucalypt plantation in Guangxi, southern China, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 202, 15 March, Pages 61-68, ISSN 0168-1923.
- 126.** Zongjian Yang, Thomas R. Sinclair, Maggie Zhu, Carlos D. Messina, Mark Cooper, Graeme L. Hammer, Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 78, May 2012, Pages 157-162, ISSN 0098-847.